

**X バンド MP レーダ雨量を用いた都市流域における
豪雨の時空間および流出特性に関する基礎的研究**

2019 年 3 月

米 勢 嘉 智

首 都 大 学 東 京

X バンド MP レーダ雨量を用いた都市流域における 豪雨の時空間および流出特性に関する基礎的研究

目 次

第 1 章 序 論	1
1-1 研究の背景	1
1-2 既往の研究	5
1-2-1 X バンド MP レーダ雨量の観測特性に関するこれまでの研究	5
1-2-2 X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析に関するこれまでの研究	7
1-3 本研究の目的と構成	9
1-3-1 本研究の目的	9
1-3-2 本論文の構成	11
第 2 章 1 分値データによる X バンド MP レーダ雨量の精度評価	14
2-1 緒言	14
2-2 対象流域および対象降雨	15
2-3 地上雨量データと X バンド雨量データの特性	22
2-4 流域平均雨量を用いた X バンド MP レーダ雨量精度の評価	29
2-4-1 1 分値データによる精度評価	29
2-4-2 10 分値データによる精度評価	37
2-4-3 X バンド MP レーダの 1 分値と 10 分値雨量の差異	39
2-5 結語	41
第 3 章 X バンド MP レーダ雨量の時空間特性解析	43
3-1 緒言	43
3-2 対象地上雨量観測所および対象降雨	44
3-3 X バンド MP レーダ雨量と地上雨量との時空間相関特性	50
3-3-1 時空間解析の概要	50
3-3-2 観測所直上メッシュと周辺メッシュにおける時空間相関特性	53
3-4 雨域移動特性の分析	62
3-4-1 X バンド MP レーダ雨量による降雨移動特性	62

3-4-2 移流ベクトルの方向および速度	65
3-5 結語.....	69
第4章 USF モデルによる豪雨流出特性	71
4-1 緒言.....	71
4-2 対象流域および対象豪雨.....	72
4-3 対象豪雨イベントの豪雨特性.....	74
4-3-1 使用する降雨データ種類.....	74
4-3-2 時空間的な相関特性を考慮した補正 XRAIN.....	76
4-3-3 4 種類の雨量データによる雨量精度評価.....	77
4-4 豪雨の流出ハイドログラフ再現性.....	82
4-4-1 洪水流出モデルの概要	82
4-4-2 洪水流出モデルのパラメータ設定方法.....	84
4-4-3 流出ハイドログラフの再現性.....	93
4-4-4 豪雨イベント毎のパラメータの変動特性	98
4-5 結語.....	100
第5章 分布型流出モデルによる豪雨流出特性	102
5-1 緒言.....	102
5-2 対象流域および対象豪雨.....	103
5-3 対象豪雨イベントおよび降雨データ種類	105
5-4 流出解析モデルおよびパラメータ設定手法.....	107
5-4-1 分布型流出モデルの概要および検討ケース.....	107
5-4-2 検討対象豪雨ケース	109
5-4-3 分布型流出モデルのパラメータ設定方法.....	110
5-5 各豪雨における流出ハイドログラフの再現性	111
5-5-1 豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性.....	111
5-5-2 豪雨イベント毎の最適パラメータの特性	121
5-6 全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性.....	123
5-7 結語.....	132
第6章 結 論	134

図 表 目 次

図 1-1	XバンドMPレーダネットワーク（XRAIN）の整備状況	3
図 1-2	XバンドMPレーダの特徴	4
図 1-3	XバンドMPレーダ雨量と地上雨量(ティーセン法)の流域平均雨量比較事例	6
図 1-4	道路上浸水深のコンター図と河川水位の時間変化図の事例 ¹²⁾	8
図 1-5	XバンドMPレーダ雨量を用いた都市流域における豪雨の時空間および流出特性に関する基礎的研究のワークフロー	10
図 2-1	対象とした神田川上流域位置図	16
図 2-2	対象流域の地上雨量観測所とティーセン分割	17
図 2-3	関東地方におけるXバンドMPレーダ雨量の整備位置図	19
図 2-4	対象流域とXバンドMPレーダの位置関係	19
図 2-5	地上雨量・XバンドMPレーダハイトグラフ比較図（豪雨イベント No.1）	23
図 2-6	地上雨量とXバンドMPレーダ雨量の総雨量比（XバンドMPレーダ雨量/地上雨量）と相関係数	25
図 2-7	豪雨イベント No.1～5 と No.6～10 の総雨量比および 1 分雨量値の相関係数	27
図 2-8	XバンドMPレーダと地上雨量 1 分値の散布図（久我山橋地点）	28
図 2-9	対象流域のメッシュエリア	30
図 2-10	豪雨イベント毎のXバンドMPレーダと地上雨量による流域平均総雨量	30
図 2-11	XバンドMPレーダによるメッシュ累加雨量図	31
図 2-12	流域平均雨量 1 分値（地上雨量・XバンドMPレーダ）のハイトグラフ比較図	33
図 2-13	流域平均雨量における総雨量比（XバンドMPレーダ雨量/地上雨量）と相関係数	34
図 2-14	XバンドMPレーダと地上雨量による流域平均雨量 1 分値の散布図	35
図 2-15	豪雨イベント No.5 のピーク降雨時の降雨状況（2013/7/28 15:50）	36

図 2-16	流域平均雨量 10 分値（地上雨量・X バンド MP レーダ）のハイエトグラフ 比較図	37
図 2-17	地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の相関係数	38
図 2-18	豪雨イベント No.1（後半）の流域平均雨量の比較図	40
図 2-19	豪雨イベント No.5 の流域平均雨量の比較図	40
表 2-1	選定した 10 豪雨イベント	21
図 3-1	地上雨量観測所位置図	44
図 3-2	地上雨量と X バンド MP レーダ雨量のハイエトグラフ	48
図 3-3	地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の時空間解析の概要	51
図 3-4	地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の遅れ時間 τ の概念	52
図 3-5	地上雨量と観測所周辺メッシュにおける X バンド MP レーダ雨量の相関係数 の時空間分布	54
図 3-6	観測所直上メッシュと観測所周辺メッシュにおける X バンド MP レーダ雨量 と地上雨量との最大相関係数	57
図 3-7	X バンド MP レーダ雨量状況（豪雨イベント I-3 6/25 12:18 時点）	61
図 3-8	X バンド MP レーダ雨量メッシュ位置(0,0)および(3,4)におけるハイエトグラフ （豪雨イベント I-3, 遅れ時間 $\tau=0$ ）	61
図 3-9	X バンド MP レーダメッシュ雨量および移流ベクトル（1 分ピッチ）	63
図 3-10	観測所直上メッシュにおける移流ベクトルの方向および速度（1 分ピッチ）	66
図 3-11	ハイエトグラフ（豪雨イベント I-2）	67
図 3-12	X バンド MP レーダメッシュ雨量図（豪雨イベント I-2）	68
表 3-1	選定した検証対象 5 豪雨イベント	46
表 3-2	観測所直上メッシュおよび観測所周辺メッシュにおける X バンド MP レーダ 雨量と地上雨量との最大相関係数とその遅れ時間および総雨量比	59
図 4-1	対象流域および地上雨量観測所	72
図 4-2	対象流域メッシュエリア	75
図 4-3	ハイエトグラフおよび累加雨量比較図	78
図 4-4	水防災システムとの総雨量比および相関係数	81
図 4-5	USF（Urban Storage Function）モデルの概念図	82

図 4-6	SCE-UA 法のフロー	85
図 4-7	CCE アルゴリズム (Competitive Complex Evolution strategy) のフロー	86
図 4-8	世代毎 (Generation) の流出ハイドログラフの再現性	88
図 4-9	各世代 (Generation) の RMSE グラフ	91
図 4-10	各世代 (Generation) の PEP グラフ	92
図 4-11	降雨種類別の流出ハイドログラフの再現性	94
図 4-12	降雨種別毎の RMSE のグラフおよび数値表	96
図 4-13	累加雨量メッシュ図 (豪雨イベント No.5 ピーク降雨付近)	97
図 4-14	降雨種別毎のパラメータ (k1, p1) 比較図	99
表 4-1	対象豪雨イベント一覧表	73
表 4-2	使用する降雨データの諸元一覧	75
表 4-3	XRAIN 時空間補正量	76
表 4-4	各世代 (Generation) の RMSE 一覧表	91
表 4-5	各世代 (Generation) の PEP 一覧表	92
図 5-1	対象流域および地上雨量観測所	103
図 5-2	対象流域メッシュエリア	106
図 5-3	土研分布型流出モデルの概念図	108
図 5-4	豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性 (Case1 流域平均雨量)	112
図 5-5	豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性 (Case2 メッシュ雨量)	114
図 5-6	降雨データの種類の RMSE 図	117
図 5-7	XRAIN メッシュ雨量分布図 (豪雨イベント No.3 ピーク雨量付近)	118
図 5-8	豪雨イベント No.4 の流出ハイドログラフ再現性の差異	120
図 5-9	豪雨イベント毎の最適パラメータ	122
図 5-10	全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性 (Case1 流域平均雨量)	124
図 5-11	全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性 (Case2 メッシュ雨量)	126
図 5-12	共通パラメータによる降雨データの種類の RMSE 図	129
図 5-13	降雨データの種類の RMSE 図	130
図 5-14	全豪雨イベント共通パラメータ	131
表 5-1	対象豪雨イベント一覧表	104
表 5-2	使用する降雨データの諸元一覧	105

表 5-3	降雨データの種類および降雨の空間分布の考え方	109
表 5-4	降雨データの種類別の RMSE 平均値, 最大値, 最小値	130

第 1 章 序 論

第1章 序 論

1-1 研究の背景

近年、ゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な集中豪雨により洪水被害が頻発している。特に首都圏においては、人口や生産基盤等の集中、都市化や気候変動等に起因した洪水流量の増大などの社会・環境条件により水害リスクが一層増大している。都市域の中小河川では、短時間における集中豪雨により、河川の氾濫や内水による浸水被害の危険性が高いため、都市流出解析では詳細な1分値降雨や水位観測データを用いた流出解析が行われている^{1),2)}。このような流出解析による河川水位の推定のためには、第一に詳細な降雨の空間・時間分布を的確に把握することが重要となる。

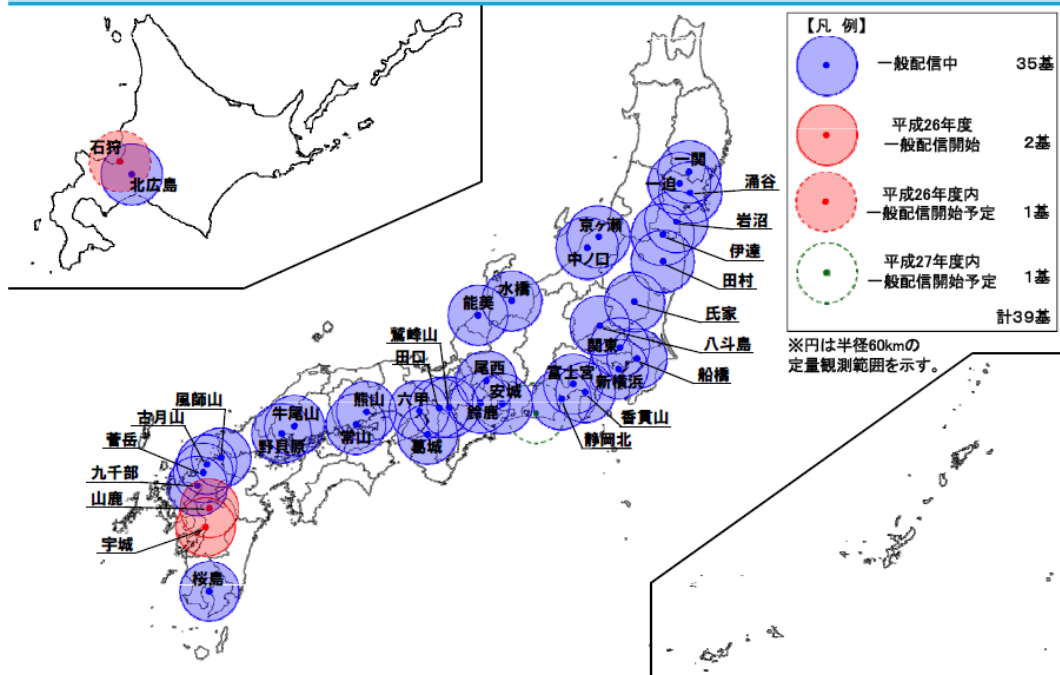
国土交通省が整備するXバンドMPレーダネットワーク(XRAIN)は、2010年からの試験運用期間を経て2014年3月に本格運用を開始し、詳細な降雨の時空間分布の情報が入手できる環境が整備されている(図1-1, 図1-2)。レーダによる降雨観測特性や高精度な降雨量推定についての研究も進められてきており、XバンドMPレーダ雨量の精度向上が図られている^{3),4)}。

XバンドMPレーダ雨量の雨量精度に関する既往の研究においては、レーダ雨量における観測特性を活かして、数十km²程度などの比較的広域を対象としている事例が多く、かつ地上雨量の観測時間間隔との整合にも考慮してXバンドMPレーダ雨量の1分間隔の観測データを10分値や1時間などに換算して使用している事例がほとんどである。また、XバンドMPレーダ雨量は、レーダ波による空中降雨観測であるため、地上へ到達する雨量(地上雨量)との間には、時空間的な観測誤差が存在すると想定されるが、XバンドMPレーダ雨量と地上雨量における観測時差についての定量的な評価を行った事例はほとんどない。さらに、既往の研究のほとんどが地上雨量観測所と観測所直上メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量のハイトグラフをもとにした比較であり、観測所周辺メッシュデータを用いた豪雨を対象とした空間的な解析事例はあまりなく、さらに観測時差まで含めた時空間的な観測特性について述べた事例は見受けられない。

しかし、都市域の中小河川のような詳細なエリアを対象とする場合には、より短い時間間隔、狭い範囲における降雨量の精度が重要となる。そのため、X バンド MP レーダ雨量が有する詳細な時空間分解能の精度を把握しておくことが非常に重要であり、1 分間隔の降雨観測精度やその時空間的な観測特性を明確にすることが切望されている。

また、この X バンド MP レーダ雨量の詳細な時空間分解能が、流出解析を実施した場合に流出ハイドログラフの再現性にどのような影響を与えるか把握しておくことは、豪雨による河川水位や浸水被害を推定するために重要となる。X バンド MP レーダ雨量による流出解析に関する既往の研究においては、X バンド MP レーダ雨量を用いた都市域における流出解析や氾濫解析を実施している事例は見受けられるものの、そもそも X バンド MP レーダ雨量の詳細な雨量データを用いることにより、都市中小河川における流出解析精度がどのような影響を受けるのかについては明らかにされておらず、流出量ハイドログラフにおける再現性（Reproducibility）という観点から検討した事例も見受けられない。そのため、X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析の実施により、X バンド MP レーダ雨量の詳細な時空間分布がハイドログラフの再現性にどのような影響を与えるのかについて明確にしておくことは極めて重要である。

XRAINの整備状況(平成27年度一般配信開始予定含む)



出典: www.mlit.go.jp/common/001046714.pdf

図 1-1 XバンドMPレーダネットワーク (XRAIN) の整備状況

XRAINの特徴

参考資料

- XRAINは、XバンドのMP(マルチパラメータ)レーダを用い、高精度・高分解能で、ほぼリアルタイムで配信することが可能。

1. 高分解能(Xバンドの特性)

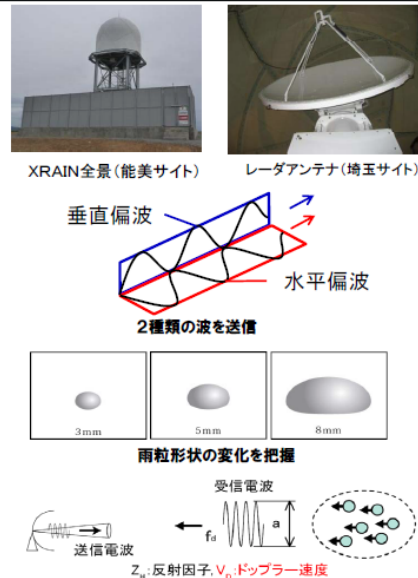
- Xバンドレーダは、Cバンドレーダに比べ波長が短く、高分解能な観測が可能。
(Xバンド: 8~12GHz、Cバンド: 4~8GHz)

2. 高いリアルタイム性(MPレーダの特性)

- 2種類の偏波(水平・垂直)を送信することで、雨粒の形状等を把握し、雨滴の扁平度等から雨量を推定。
- 地上雨量計による補正を行わずに、高精度な雨量データをほぼリアルタイムで配信することが可能。

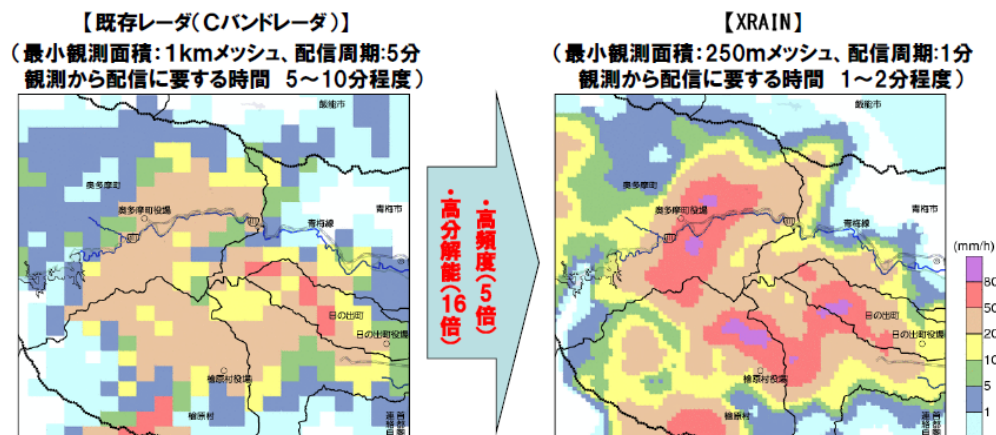
3. 雨滴の移動方向・移動速度の観測が可能(ドップラー機能)

- ドップラー機能により、雨滴の移動方向と移動速度を把握することで、降雨予測等への活用が期待。



XRAINとCバンドレーダの比較

- XRAINは、従来のレーダ(Cバンドレーダ)と比べて、高頻度(5倍)、高分解能(16倍)での観測が可能。
- これまで5~10分程度かかっていた配信に要する時間を、1~2分程度に短縮。



※Cバンドレーダ(定量観測半径120km)は広域的な降雨観測に適するのに対し、XRAIN(定量観測半径60km)は観測可能エリアは小さいものの局地的な大雨についても詳細かつリアルタイムでの観測が可能。

出典: www.mlit.go.jp/common/001046714.pdf

図 1-2 XバンドMPレーダの特徴

1-2 既往の研究

1-2-1 Xバンド MP レーダ雨量の観測特性に関するこれまでの研究

Xバンド MP レーダ雨量における研究としては、レーダ観測機器における降雨観測特性および高精度な降雨量推定手法についての研究が進められてきている。土屋ら³⁾は、Xバンド MP レーダにおける降雨減衰補正および合成処理手法の改良による精度向上、五道ら⁴⁾は、Xバンド MP レーダの Kdp-R 関係式の適用範囲の拡張による観測精度の向上を図っており、これらの研究により Xバンド MP レーダによる精度高い降雨量推定が可能となってきた。

高堀ら⁵⁾は、Xバンド MP レーダによる降雨量推定精度に関して、レーダサイトから約 30km の範囲では高い精度で降雨強度を推定できるものの、30km を超えると誤差が大きくなることを述べている。林ら⁶⁾は、Xバンド MP レーダによる降雨量は、20km 範囲内は推定値が地上雨量とよく一致しており、地上雨量と同等の降雨量推定ができること、また、林ら⁷⁾においては、強い降雨強度を伴う短時間の降水イベントでは、Cバンドレーダ雨量と比較して Xバンド MP レーダの推定値が優位であることを確認している。さらに、庄ら⁸⁾は、名古屋地区の 2011 年 9 月 20 日の強雨事例について 10 分地上雨量と Xバンド MP レーダによる雨域解析を行い、両者の結果がよく一致していることを確認している。これらの Xバンド MP レーダ雨量精度に関する検証は、数十 km 程度の比較的広域を対象としたものである。

原田ら⁹⁾は、Xバンド MP レーダについて、地上雨量との比較によりレーダ雨量は十分な精度を持つことを確認するとともに、中小河川 (21km²) を対象とした場合に空間的に大きな変動性をもつ豪雨分布に対しては、レーダ雨量に基づく流域平均降雨は、地上雨量を用いたティーセン法による流域平均降雨で見られた一部の観測値に過剰に影響を受けることがない点をレーダ雨量の有効性として述べている (図 1-3)。

なお、これらの Xバンド MP レーダ雨量を用いた精度検証は、地上雨量の観測時間間隔との整合にも考慮して 1 分間隔の観測データを 10 分値などに換算したものをを用いている。

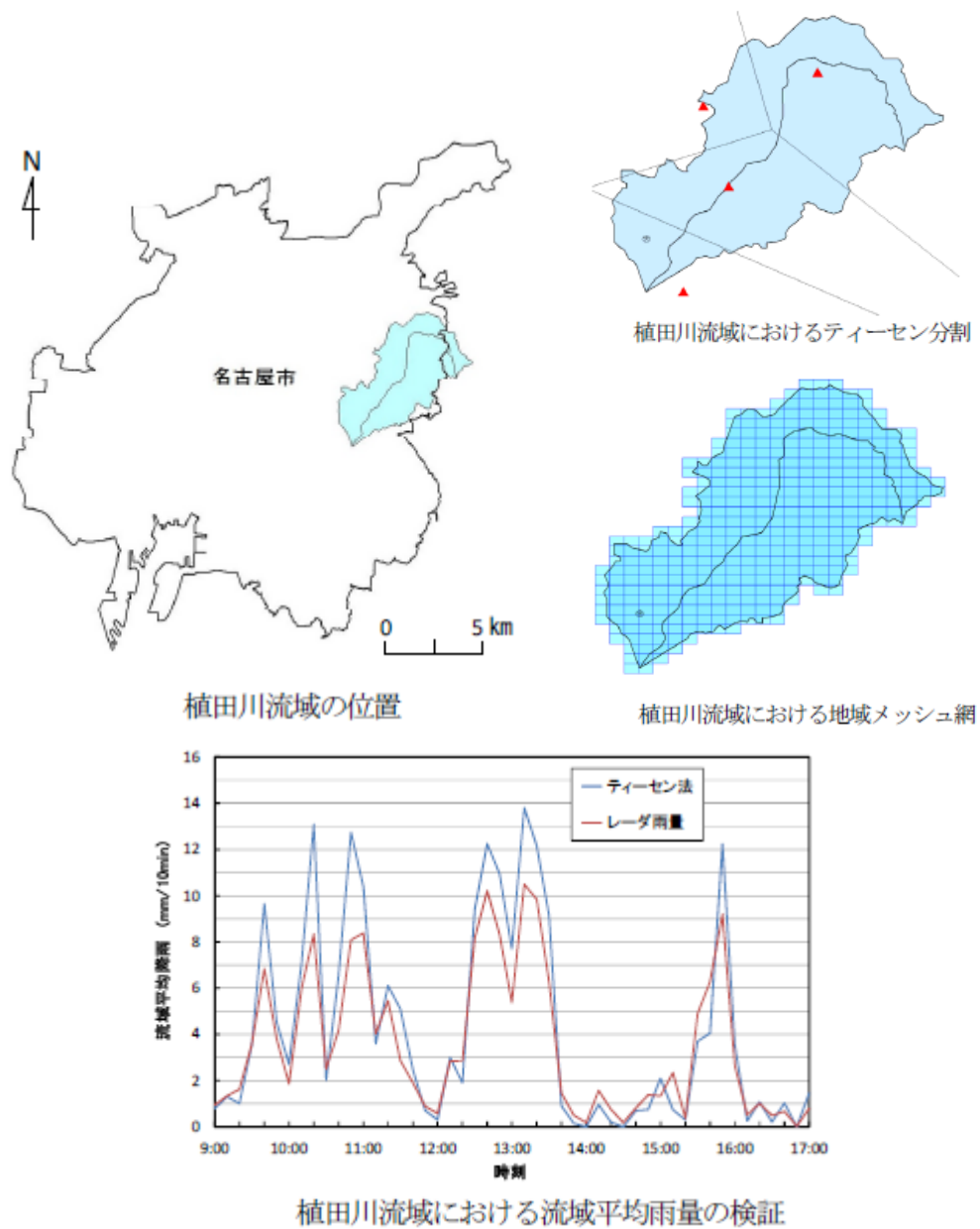


図 1-3 Xバンド MP レーダ雨量と地上雨量(ティーセン法)の流域平均雨量比較事例⁸⁾

1-2-2 XバンドMPレーダ雨量を用いた流出解析に関するこれまでの研究

XバンドMPレーダ雨量を用いた流出解析に関する研究も進められている。佐山ら¹⁰⁾は、XバンドMPレーダの不確実性についてランダム誤差成分を含めた模擬降雨を生成し、分布型流出モデルに入力することにより流出解析への影響を分析している。同研究におけるレーダ雨量は、地上雨量の観測時間間隔との整合に考慮し、10分および60分雨量を使用している。また、1分値によるXバンドMPレーダ雨量を用いた事例としては、藤田ら¹¹⁾は、神戸市都賀川を対象に分布型降雨流出・洪水氾濫モデルを用いて、XバンドMPレーダ雨量による流出解析を実施している。また、関根ら¹²⁾は、神田川を対象とした街路ネットワーク浸水・氾濫解析モデルを構築し、XバンドMPレーダ雨量を入力した解析を実施している（図1-4）。

ただし、これらの研究では、XバンドMPレーダ雨量を用いた流出解析を実施しているものの、そもそもXバンドMPレーダの詳細な雨量データを用いることにより流出解析の精度がどのような影響を受けるのかについては明らかにされていない。また流出ハイドログラフにおける再現性という観点から検討した他の事例も見受けられない。

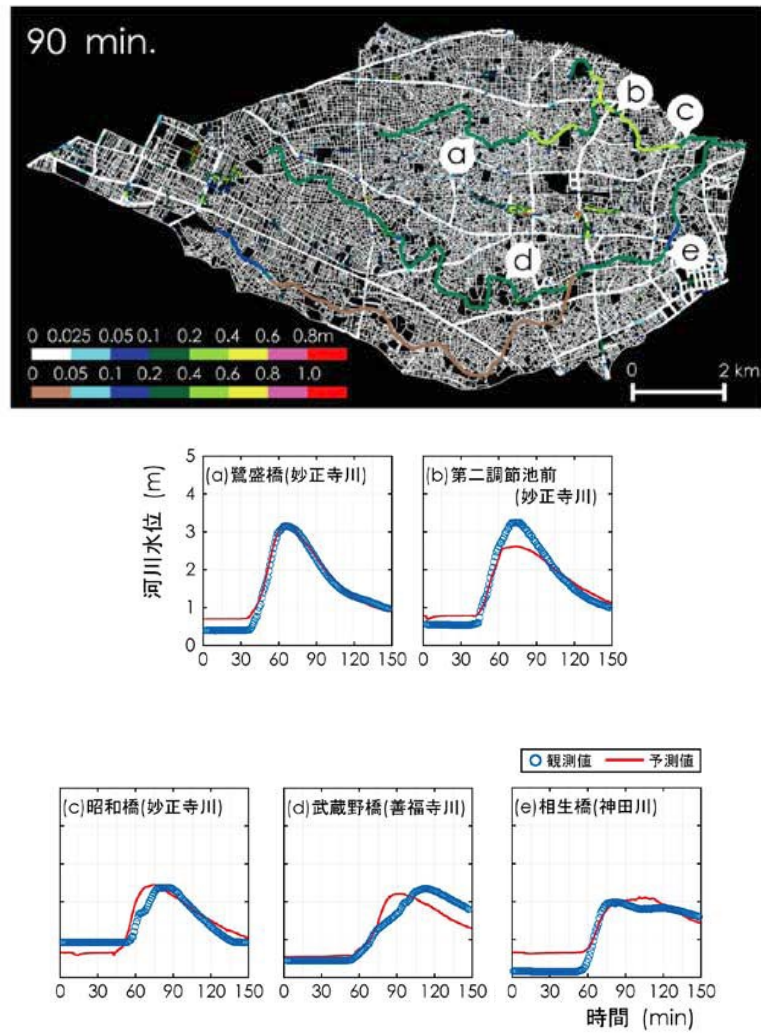


図 1-4 道路上浸水深のコンター図と河川水位の時間変化図の事例¹²⁾

1-3 本研究の目的と構成

1-3-1 本研究の目的

前節にて述べたとおり，都市域の中小河川のような詳細なエリアを対象とする場合には，短い時間間隔，狭い範囲における降雨量の精度が重要となるが，X バンド MP レーダ雨量が有する 1 分値の時間分解能や 250m メッシュの空間分解能そのものの降雨精度は明確となっておらず，その精度および時空間特性を明らかにすることが必要である．さらに，都市域の中小河川における流出量や河川水位の精度確保のためには，地上雨量を用いる場合が多い流出解析に X バンド MP レーダを用いることにより，流出解析の精度や流出ハイドログラフの再現性がどのような影響を受けるのか検証し，明確にすることが喫緊の課題となっている．

そこで本研究は，都市域の中小河川を対象とし，X バンド MP レーダ雨量の精度および時空間特性を解明するとともに，X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析により流出特性を明確化することを目的とする．

本研究のワークフローは，図 1-5 に示すように，まず 1 分値 X バンド MP レーダ雨量の精度について，東京都水防災総合情報システムによる 1 分値観測で空間的に密な地上雨量（観測地点間距離は区部で平均約 3km）を用いて精度評価を実施するとともに，地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の地上雨量観測所周辺メッシュの降雨データを用いた時空間相関解析を実施した．次に，流域平均雨量を入力とする集中型概念モデルおよび X バンド MP レーダ雨量が有する空間分解能を直接入力可能な分布型流出モデルを対象として，X バンド MP レーダ雨量と地上雨量を用いた流出解析を実施し，降雨データの差異が各モデルの流出ハイドログラフの再現性に与える影響を明らかにした．

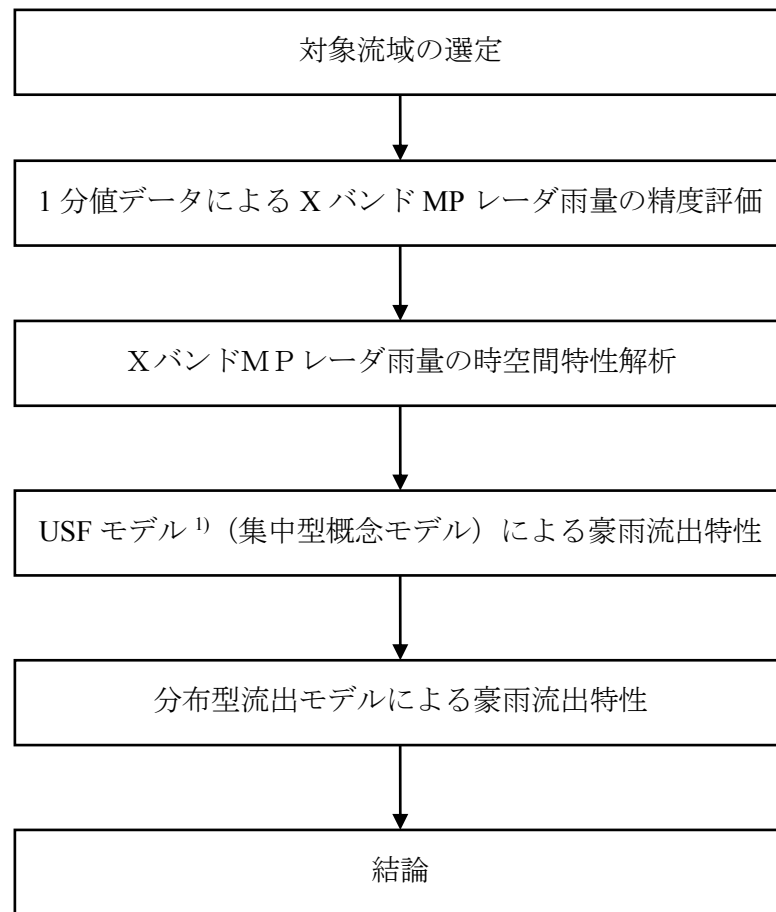


図 1-5 X バンド MP レーダ雨量を用いた都市流域における豪雨の時空間および流出特性に関する基礎的研究のワークフロー

1-3-2 本論文の構成

本論文は、全 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的について述べ、本論文の構成を示した。

第 2 章では、東京都の神田川上流域を対象として 2013 年の地上雨量観測所における 30 分降雨強度を基に 10 豪雨イベントを選定し、1 分値地上雨量と観測所直上メッシュの 1 分値 X バンド MP レーダ雨量との比較によりレーダ雨量の精度を検証し、X バンド MP レーダ雨量の降雨データそのものの精度を検証する。

第 3 章では、神田川上流域における 2013 年の上位 5 豪雨イベントを対象に、X バンド MP レーダ雨量の観測所直上メッシュのみならず観測所周辺メッシュ範囲のレーダ雨量データを含めて、地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の時空間相関特性解析を実施し、X バンド MP レーダ雨量の時空間特性を明らかにする。

第 4 章では、神田川上流域において入力降雨データの差異が流出解析にどのような影響を与えるかを把握するため、X バンド MP レーダ雨量および空間的に密な地上雨量による流域平均雨量を用いて、都市の流出機構を考慮した集中型概念モデルである USF (Urban Storage Function) モデルによる流出解析を実施し、流出ハイドログラフの再現性を検証する。

第 5 章では、第 4 章と同様の豪雨イベントを対象とし、X バンド MP レーダ雨量の降雨分布を直接入力可能な 250m メッシュの土研分布型流出モデルを用いることにより、降雨データの詳細な空間分解能が流出ハイドログラフの再現性に与える影響を検証する。

最後に第 6 章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について述べる。

【参考文献】

- 1) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝: 地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007.
- 2) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博: 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.217-230, 2009.
- 3) 土屋修一, 川崎将生, 五道仁実: 降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良によるXRAIN観測雨量の精度向上, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.4, pp.I_457-I_462, 2015.
- 4) 五道仁実, 内藤正彦, 土屋修一: Kdp-R関係式の適用範囲拡張によるXバンドMPレーダの観測精度の向上, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_505-I_510, 2014.
- 5) 高堀章, 前坂剛, 三隅良平: Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定- 複数仰角PPIデータを用いた改善効果について-, 防災科学研究所報告, 第73号, 2009.
- 6) 林義晃, 手計太一, 山崎惟義: 北陸地方における地上雨量観測所を用いたXバンドMPレーダの降水量(降雪量)推定精度の評価, 水文・水資源学会誌, Vol.27, No2, Mar.2014, pp.67-76, 2014.
- 7) 林義晃, 手計太一, 永島健, 山崎惟義: 北陸地方におけるXバンドMPレーダの降水量推定精度に関する時空間分布特性, 水文・水資源学会誌, Vol.28, No5, Mar.2015, pp.221-232, 2015.
- 8) 庄建治朗, 谷口健司, 富永晃宏: 10分雨量データとXRAINデータを用いた名古屋における強雨事例の雨域特性解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_487-I_492, 2014.
- 9) 原田守博, 羽澄貴史: XバンドMPレーダ情報に基づく局地的短時間豪雨の雨域性状の確率論的評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_511-I_516, 2014.
- 10) 佐山 敬洋, 藤岡奨, 越田智喜, 三浦裕司, 岩見洋一, 深見和彦: XバンドMPレーダによる雨量観測の誤差特性とその時空間構造を反映した降雨場生成法, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.70, No.4, I_517-I_522, 2014.
- 11) 藤田一郎, 小林健一郎, 奥山貴也, 熊野元気: ゲリラ豪雨に対する都賀川の流出モデル開発と河川監視カメラを活用した水位流量ハイドロの検証, 土木学会論文集

B1(水工学) Vol.72, No.4, I_151-I_156, 2016.

- 12) 関根正人, 浅井晃一: 神田川流域を対象とした豪雨による浸水・氾濫に関する数値予測, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.71, No.4, I_1429-I_1434, 2015.
- 13) 安陪和雄, 大八木豊, 辻倉裕喜, 安田佳哉: 分布型流出モデルの広域的適用, 水工学論文集, Vol.46, pp.247-252, 2002.

第 2 章

1 分値データによる X バンド MP レーダ雨量の精度評価

第2章 1 分値データによる X バンド MP レーダ雨量の精度評価

2-1 緒言

都市域の中小河川では、短時間における集中豪雨により、河川の氾濫や内水による浸水被害の危険性が高いため、都市流出解析では詳細な 1 分値降雨や水位観測データを用いた流出解析が行われている^{1),2)}。このような流出解析による河川水位の推定のためには、第一に詳細な降雨の空間・時間分布を的確に把握することが重要となる。

X バンド MP レーダ雨量に関する既往の研究では、地上雨量の観測時間間隔との整合にも考慮して 1 分間隔の観測データを 10 分値などに換算したものを用いて場合が多い^{3)~7)}。しかし、都市域の中小河川のような詳細なエリアを対象とする場合には、より短い時間間隔における降雨量の精度が重要となるため 1 分データそのものの精度評価を把握しておくことが重要となる。

本章では、東京都の代表的な都市中小河川である神田川上流域における 2013 年の豪雨として 10 イベントを抽出した上で、X バンド MP レーダ雨量の精度評価を実施する。雨量精度評価にあたっては、東京都内に高密度に配置された 1 分間隔観測データである東京都水防災総合情報システムの地上雨量観測データを使用し、この東京都水防災総合情報システムの地上観測雨量と X バンド MP レーダ雨量の 1 分間隔データを用いた比較を実施し、X バンド MP レーダの雨量精度を評価する。

2-2 対象流域および対象降雨

検証対象流域とする神田川は、東京都三鷹市の井の頭池にその源を発し、中野区の区境付近で善福寺川と合流し、新宿区に流入する流域面積 105.0km^2 、流路延長 25.48km の東京都内の中小河川としては最大規模の一級河川である⁸⁾。本論文では、図 2-1 に示す神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの上流域約 11.5km^2 、流路延長約 9km を対象流域として設定した。

使用する地上雨量観測所は、東京都水防災総合情報システムによる地上雨量観測データを用いた。対象流域付近における観測所は図 2-2 に示すとおりである。ティーセン分割法による流域内の 1 観測所あたりの支配面積は平均で 1.3km^2 程度、最大でも 3km^2 以下と、非常に高密度に配置されており、これらの観測所毎に 1 分間隔、最小単位 1mm にて雨量データを計測している。



図 2-1 対象とした神田川上流域位置図



図 2-2 対象流域の地上雨量観測所とティーセン分割

関東管内 X バンド MP レーダは、5 機配備されており（図 2-3）、関東全域をカバーしている。本研究の対象流域である神田川上流域は、関東局、新横浜局、船橋局の間に位置し、横浜局から 20km 程度の距離に位置している（図 2-4）。

X バンド MP レーダサイトから約 30km の範囲は高い精度で雨量強度を推定できるといわれており⁸⁾、対象流域はレーダサイトから十分近い距離に位置しており、距離による精度低下の影響は小さいと推定される。



出典: www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000083183.pdf

図 2-3 関東地方における X バンド MP レーダ雨量の整備位置図

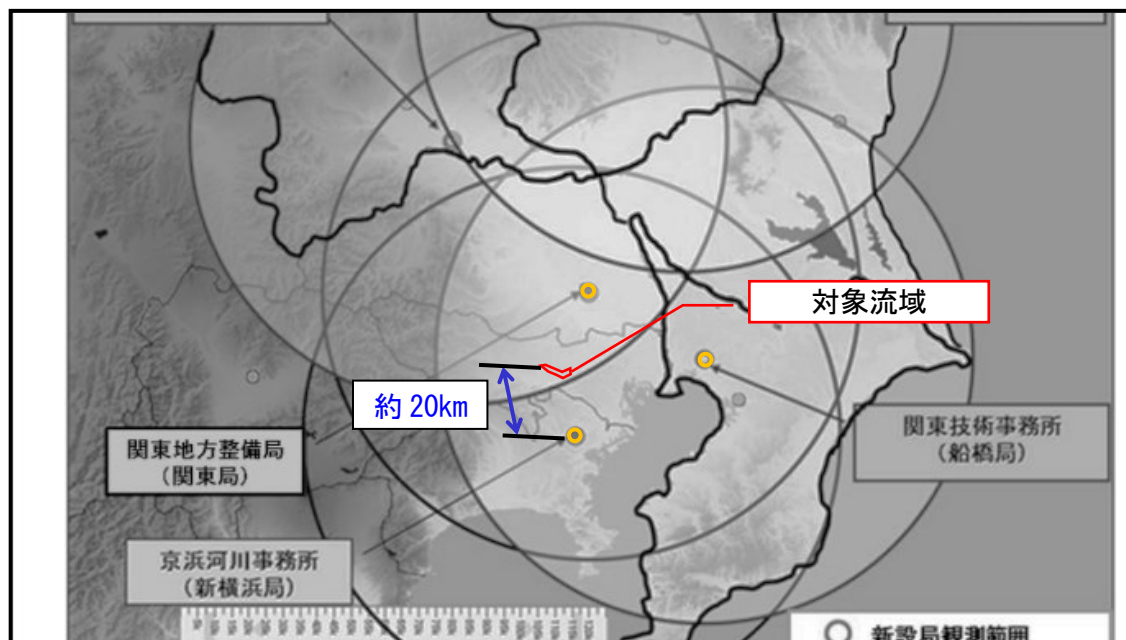


図 2-4 対象流域と X バンド MP レーダの位置関係

検証対象降雨は、2013年に発生した降雨から対象流域に豪雨をもたらした降雨を対象として抽出することとした。中小河川では、短時間の強降雨が河川水位を上昇させる。平成20年の都賀川水害の例では7月28日14:30～15:00の30分に流域周辺に強い降雨が発生し、河川水位は10分間で1.34mもの急激な上昇を示している。そのため、検証対象豪雨イベントの抽出にあたっては、対象流域中央付近に位置し水位観測も実施している久我山橋観測所を対象とし、30分累加雨量値が10mm以上の豪雨として表2-1に示す10イベントを抽出した。なお、一豪雨イベントは、6時間以上の無降水状態を伴わない一連の降雨を一降雨として設定した⁹⁾。また、表2-1には、ティーンセン分割法による流域平均総雨量の一降雨総雨量、検証降雨期間、降雨要因についても示した。

表 2-1 選定した 10 豪雨イベント

降雨イベント No.	30分累加雨量(久我山橋)		一降雨継続時間および流域平均総雨量			検証降雨期間			降雨要因
	抽出開始時間	雨量 (mm)	降雨開始時刻	降雨継続時間(時:分)	総雨量 (mm)	開始時刻	終了時刻	時間 (hr)	
1	2013/09/05 07:44	32	2013/09/04 21:11	13:46	66.3	2013/09/04 21:00	09/05 11:00	14	低気圧
2	2013/06/25 12:22	32	2013/06/25 07:33	7:07	39.7	2013/06/25 07:00	06/25 15:00	8	大気状態不安定
3	2013/08/12 17:53	31	2013/08/12 17:44	12:54	44.3	2013/08/12 17:00	08/13 07:00	14	大気状態不安定
4	2013/09/15 06:49	30	2013/09/15 03:50	17:31	135.2	2013/09/15 03:00	09/15 22:00	19	台風18号
5	2013/07/23 15:45	25	2013/07/23 15:36	2:55	21.2	2013/07/23 15:00	07/23 19:00	4	大気状態不安定
6	2013/10/16 03:42	19	2013/10/15 11:48	19:40	195.6	2013/10/15 11:00	10/16 08:00	21	台風・停滞前線
7	2013/08/21 15:55	16	2013/08/21 15:36	6:40	17.9	2013/08/21 15:00	08/21 23:00	8	前線
8	2013/04/06 22:41	16	2013/04/06 15:18	11:36	88.7	2013/04/06 15:00	04/07 03:00	12	低気圧
9	2013/08/26 23:48	12	2013/08/26 22:33	9:40	45.1	2013/08/26 22:00	08/27 09:00	11	前線
10	2013/08/11 15:16	11	2013/08/11 15:01	0:46	8.0	2013/08/11 15:00	08/11 16:00	1	大気状態不安定

2-3 地上雨量データと X バンド雨量データの特性

対象流域における X バンド MP レーダ雨量の精度を把握するため、流域内に存在する 5 箇所の地上雨量観測所（久我山，久我山橋，池袋橋，番屋橋，和田見橋）の各地上雨量と当該観測所メッシュにおける X バンド MP レーダ雨量をもとに精度を検証した。

図 2-5 には，豪雨イベント No.1 に対する各観測所の地上雨量と X バンド MP レーダ雨量のハイトグラフおよび総雨量の比較図を RMSE（平均二乗誤差の平方根）とともに示した。また，図 2-6 には同豪雨イベントのピーク付近「9/5 7:00～9:00」の拡大図を示した。これらより，地上雨量観測データは，最小単位が 1mm であり，かつ単位を mm/h に換算しているため，X バンド MP レーダ雨量と比べて値の変動が大きくなっている。豪雨イベント No.1 は，9/5 0:00～1:30 の小降雨後 5:00～6:00 に 1 山目，7:30～8:30 に 2 山目の降雨が発生する降雨波形を示しているが，X バンド MP レーダをみると地上雨量において観測しているタイミングとほぼ同じかやや早い時間帯に降雨を観測している。また，降雨期間全体の累加雨量（総雨量）でみると，久我山，久我山橋では X バンド MP レーダが地上雨量に対して 2 割程度の大きいものの全体的に再現性は概ね良好といえる。なお，総雨量ボリュームの精度評価には，既往研究³⁾などでも使用されている基礎的指標である総雨量比（X バンド MP レーダ総雨量／地上雨量総雨量）を用いて整理する。総雨量比の 1.0 から 2 割程度の乖離は，既往研究においても認められる差の範囲内である。

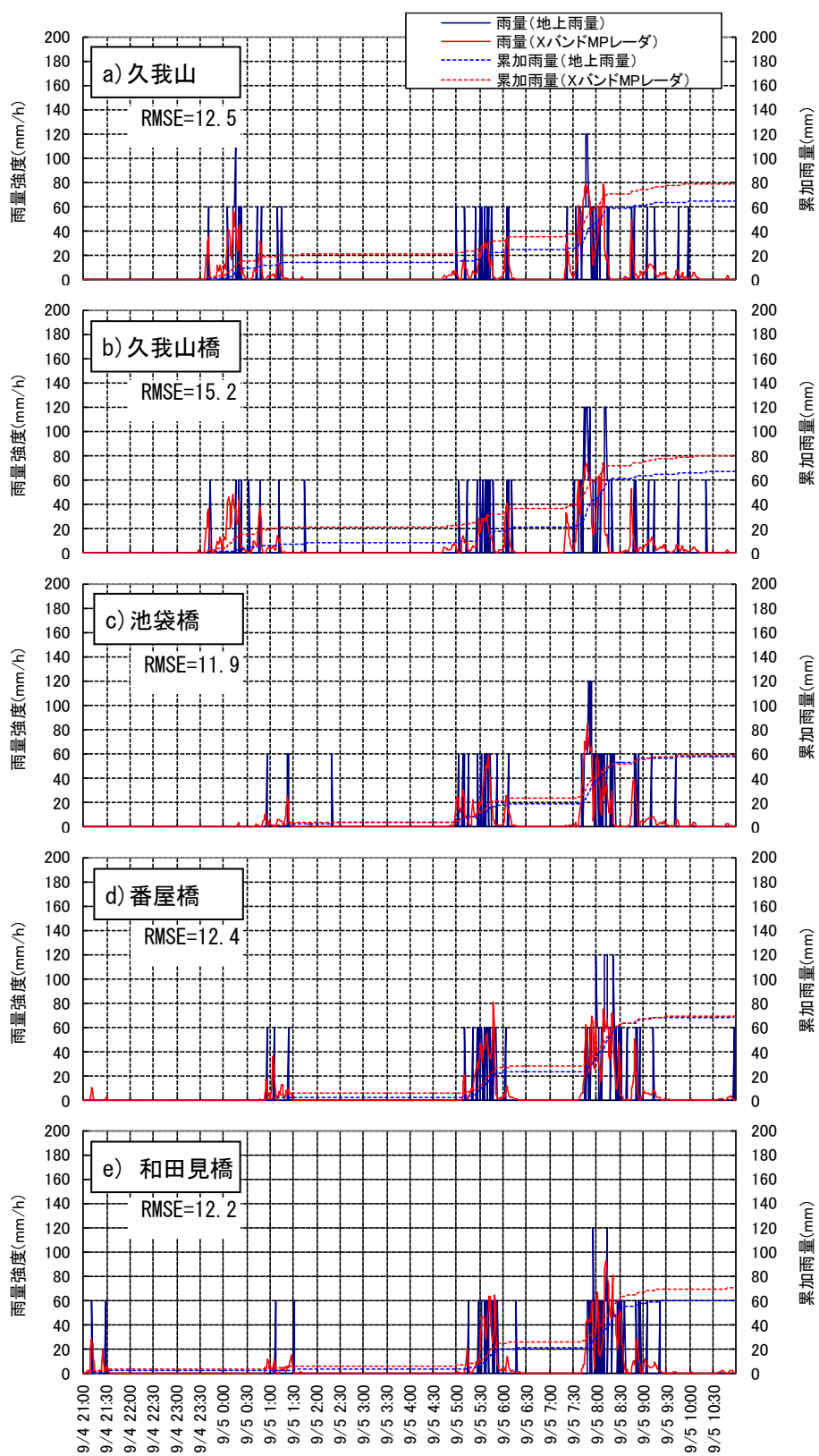


図 2-5 地上雨量・Xバンド MP レーダハイトグラフ比較図 (豪雨イベント No.1)

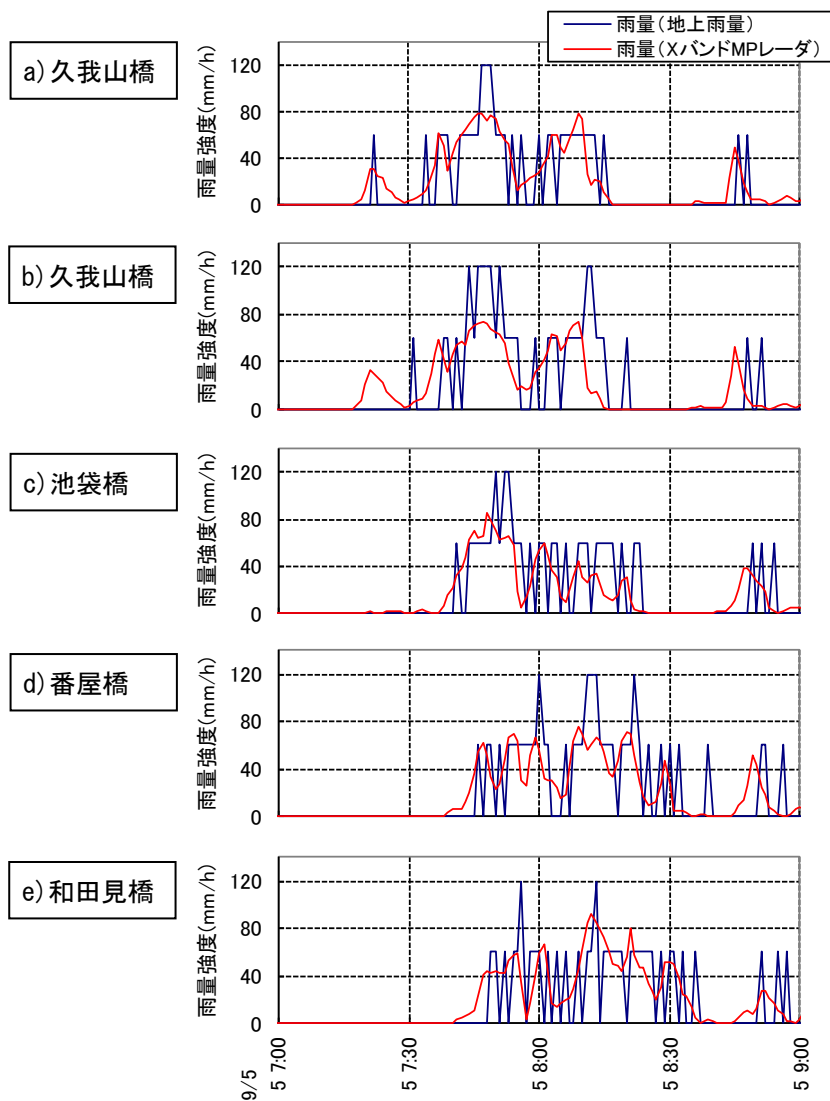


図 2-6 地上雨量・Xバンド MP レーダハイトグラフ比較図
(豪雨イベント No.1 : 「9/5 7:00~9:00」 拡大図)

図 2-7 a), b) には, 各豪雨イベントの総雨量比および 1 分雨量値の相関係数を示す。豪雨イベント毎の総雨量比をみると, 総雨量比が 1.0 に近い豪雨イベントとして, No.1, No.4, No.6, No.8 が挙げられるが, これらは, 台風性もしくは低気圧による豪雨イベントであり, 降雨期間が長くかつ総雨量が大きい降雨となっている。すなわち, 降雨量が大きい場合には, 総雨量比の精度が確保しやすい傾向があると考えられる。図 2-7 b) より, 豪雨イベント毎の 1 分雨量値の相関係数をみると, 豪雨イベントおよび地点間のばらつきはみられるが, 豪雨イベント No.1~No.5 は相関が高く, No.6 以降になるにつれて相関係数の値が低下する傾向がみられる。No.3, No.5, No.7 は, 前線や大気状態不安定に起因する豪雨イベントであり, 相関係数が相対的に高く降雨波形を良くとらえていると判断できる。

なお, 相関係数は, X バンド MP レーダ雨量もしくは地上雨量が 0 より大きいデータを対象として式(1)により算出している。

$$\text{相関係数 Cor} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x)(y_i - y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - x)^2 \sum_{i=1}^N (y_i - y)^2}} \quad (1)$$

ここに, x_i は時刻 i の地上雨量 (mm/h), y_i は時刻 i のレーダ雨量 (mm/h), x は平均地上雨量 (mm/h), y は平均レーダ雨量 (mm/h), N はデータ数である。

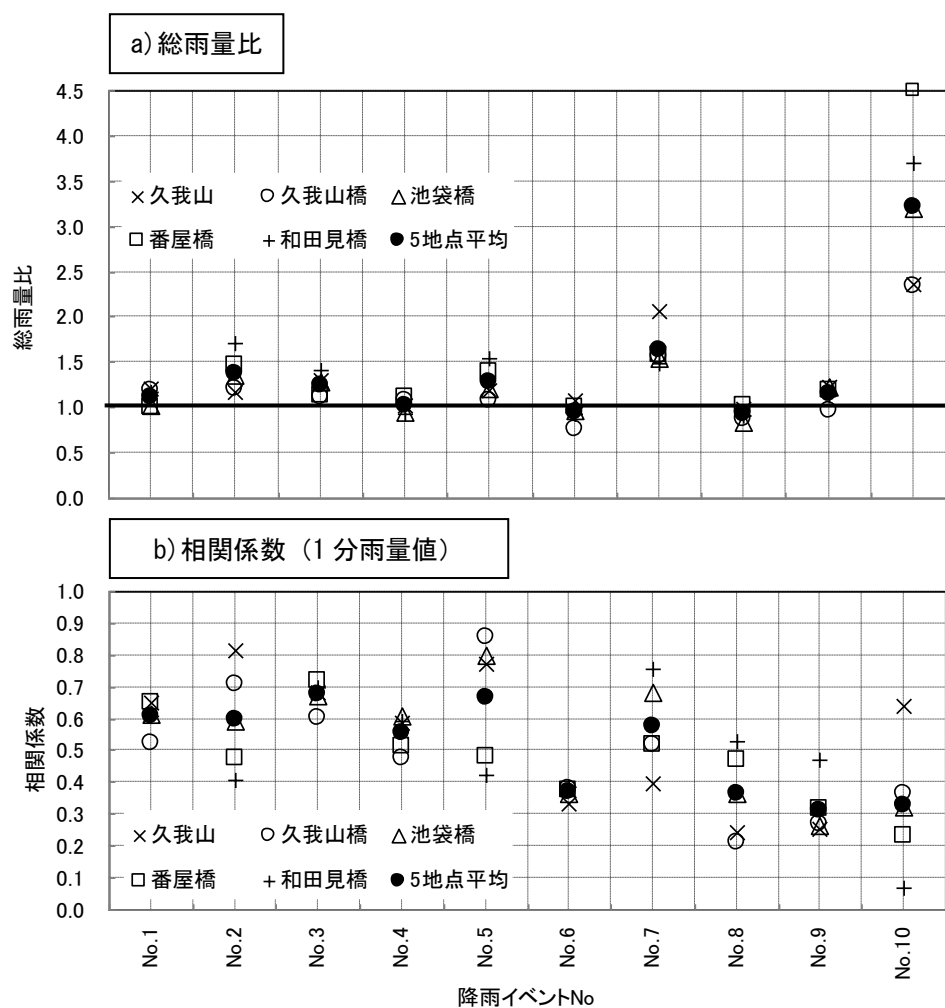


図 2-7 地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の総雨量比 (X バンド MP レーダ雨量/地上雨量) と相関係数

次に、図 2-8 a), b) は、30 分雨量の大きい豪雨イベント No.1~No.5 と比較的小さい No.6~No.10 に分けて、総雨量比と 1 分雨量値の相関係数を示したものである。図 2-8 a) より総雨量比についてみると、豪雨イベント No.1~No.5 の平均値は約 1.21, No.6~No.10 の平均値は約 1.59 であり、30 分雨量が大きい場合は総雨量比が 1.0 に近い。図 2-8 b) より、豪雨イベント No.1~No.5 平均値で 0.62, No.6~No.10 平均値で 0.39 となり、いずれも相関が低い結果となった。X バンド MP レーダは地上雨量による降雨発生タイミングを概ねとらえていると考えられるが、これは、図 2-9 の散布図に示すように地上雨量の観測最小単位が 1mm であるため、滑らかな値の変動がとらえられず値に段差ができ、相関係数が低下する要因となったと考えられる。

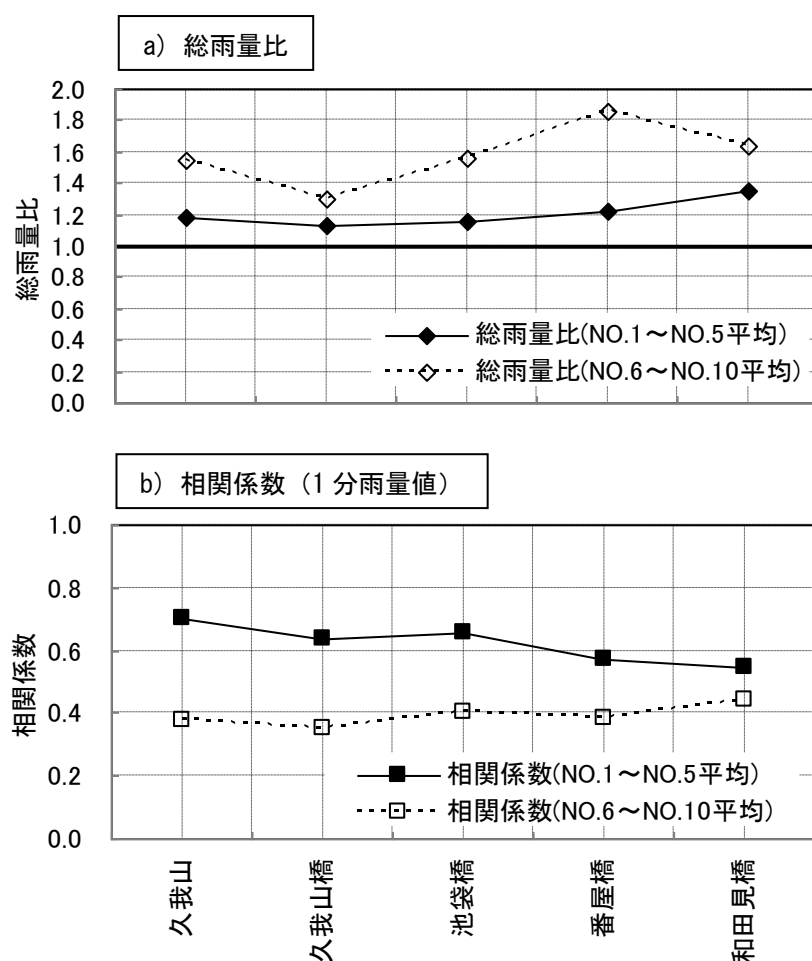


図 2-8 豪雨イベント No.1~5 と No.6~10 の総雨量比および 1 分雨量値の相関係数

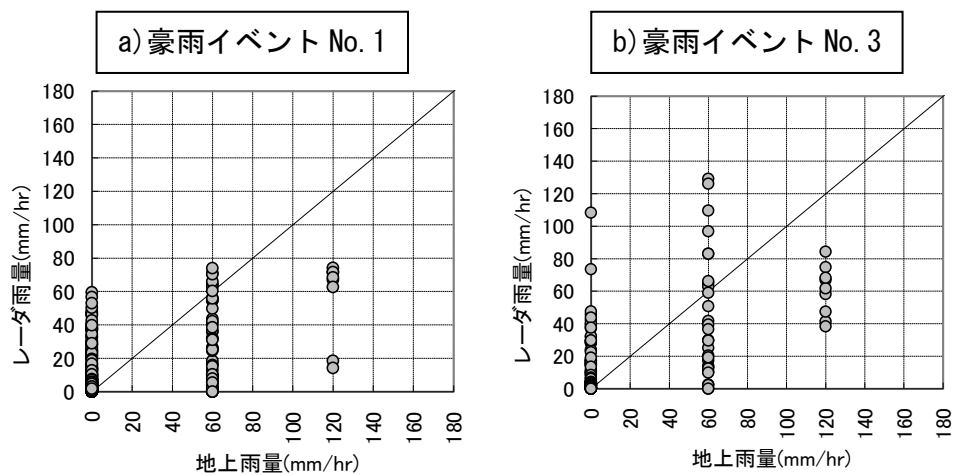


図 2-9 X バンド MP レーダと地上雨量 1 分値の散布図（久我山橋地点）

2-4 流域平均雨量を用いた X バンド MP レーダ雨量精度の評価

2-4-1 1 分値データによる精度評価

対象流域における 1 分値による流域平均雨量について精度検証を行った。地上雨量による流域平均雨量は、ティーセン分割法により算出し、X バンド MP レーダ雨量による流域平均雨量は、図 2-10 に示す流域メッシュ範囲における平均雨量とした。

図 2-11 は、X バンド MP レーダおよび地上雨量により算出した流域平均雨量による総雨量を、図 2-12 には豪雨イベント No.1～No.5 の X バンド MP レーダ雨量によるメッシュ累加雨量図を示す。図 2-12 より、No.1 や No.4 などの上流域多雨のものや No.2 のように中流域多雨降雨のものなど、小規模な流域であるが降雨の分布は一樣ではなく差が大きいことがわかる。また、図 2-11 より X バンド MP レーダと地上雨量の総雨量は、雨量が小さい場合に多少ばらつきが見られるものの概ね一致しており、様々な降雨の降り方においても総雨量は適切に把握できていると考えられる。

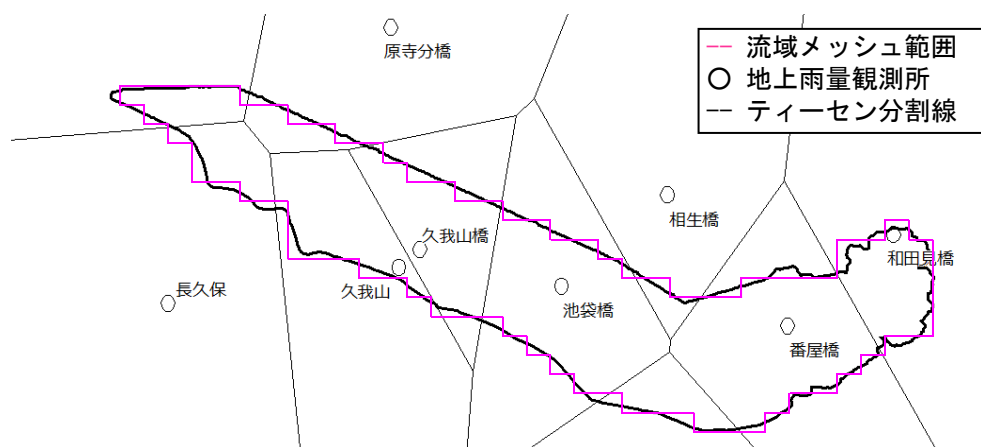


図 2-10 対象流域のメッシュエリア

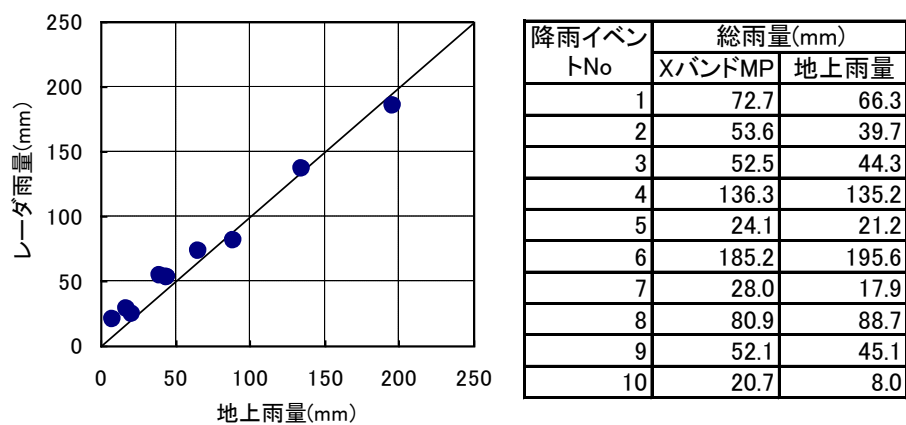


図 2-11 豪雨イベント毎の X バンド MP レーダと地上雨量による流域平均総雨量

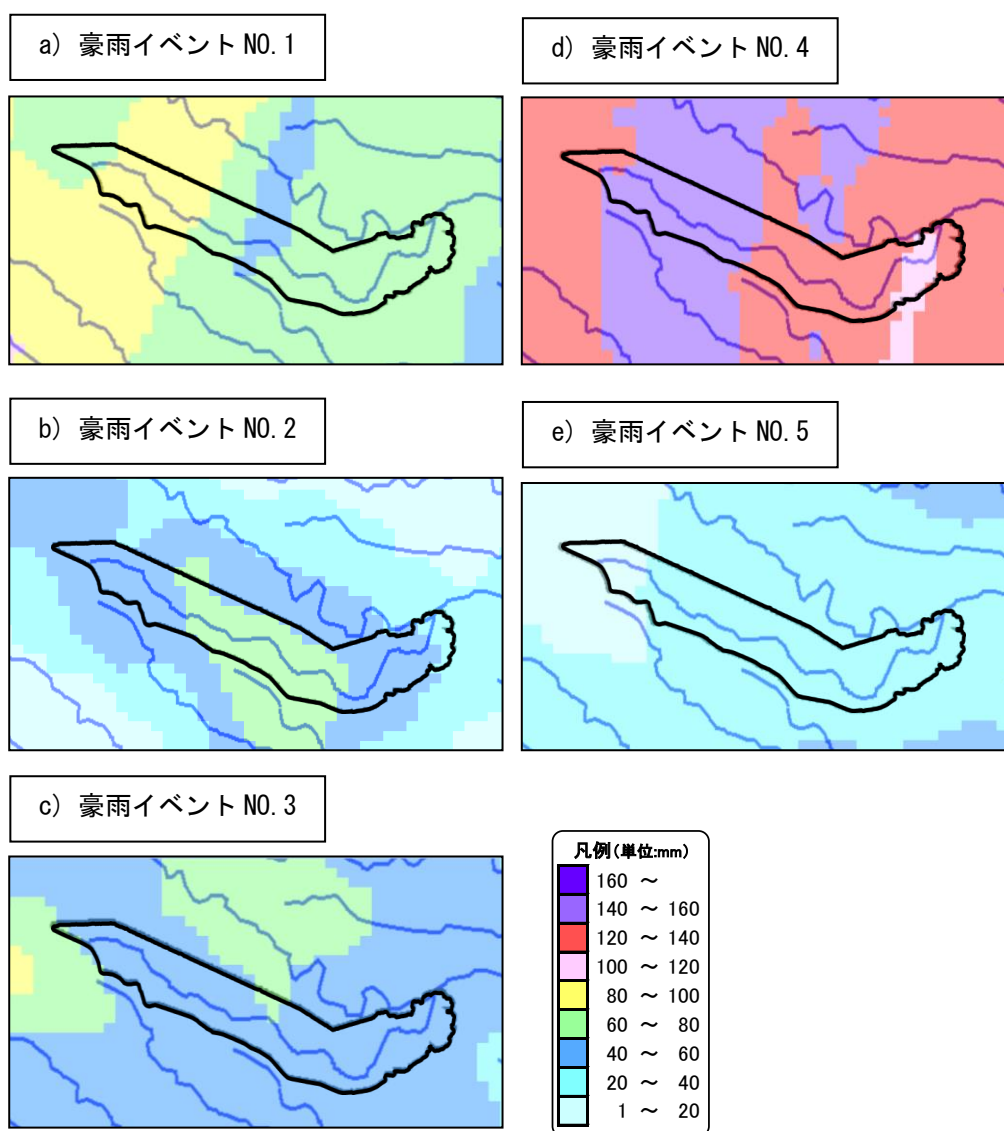


図 2-12 X バンド MP レーダによるメッシュ累加雨量図

図 2-13 には、地上雨量および X バンド MP レーダ雨量による流域平均雨量のハイエトグラフを示す。これより地上雨量による流域平均雨量は、観測所毎の地上雨量に比べて値の変動が抑えられており、X バンド MP レーダ雨量と地上雨量は、ほぼ同様の降雨波形を表現できているといえる。

図 2-14 a), b) には、それぞれ流域平均雨量による豪雨イベント毎の総雨量比および 1 分雨量値の相関係数を示した。また、同図には 5 地点（久我山、久我山橋、池袋橋、番屋橋、和田見橋）の平均値も合わせて示した。総雨量比に関しては、前述した観測所毎の総雨量比と同様、総雨量が大きいほど総雨量比は 1.0 に近い値となる。なお、総雨量が小さい豪雨イベント No.10 を除いた No.1~No.9 の総雨量比の平均値は 1.15 であり、良好な精度を確保していると判断できる。

図 2-14 b) より、流域平均雨量による 1 分雨量値の相関係数は、豪雨イベント No.1~No.5 の平均値として 0.88, No.6~No.10 は 0.71 である。これらは、5 地点平均の相関係数（No.1~No.5 平均値で 0.62）と比較して、大幅に高い値となっている。これは、図 2-15 の流域平均雨量 1 分値の散布図に示すように、図 2-9 にみられた地上雨量観測の最小単位 1mm の段差が平均化され滑らかな波形となったことが主要因であると考えられる。

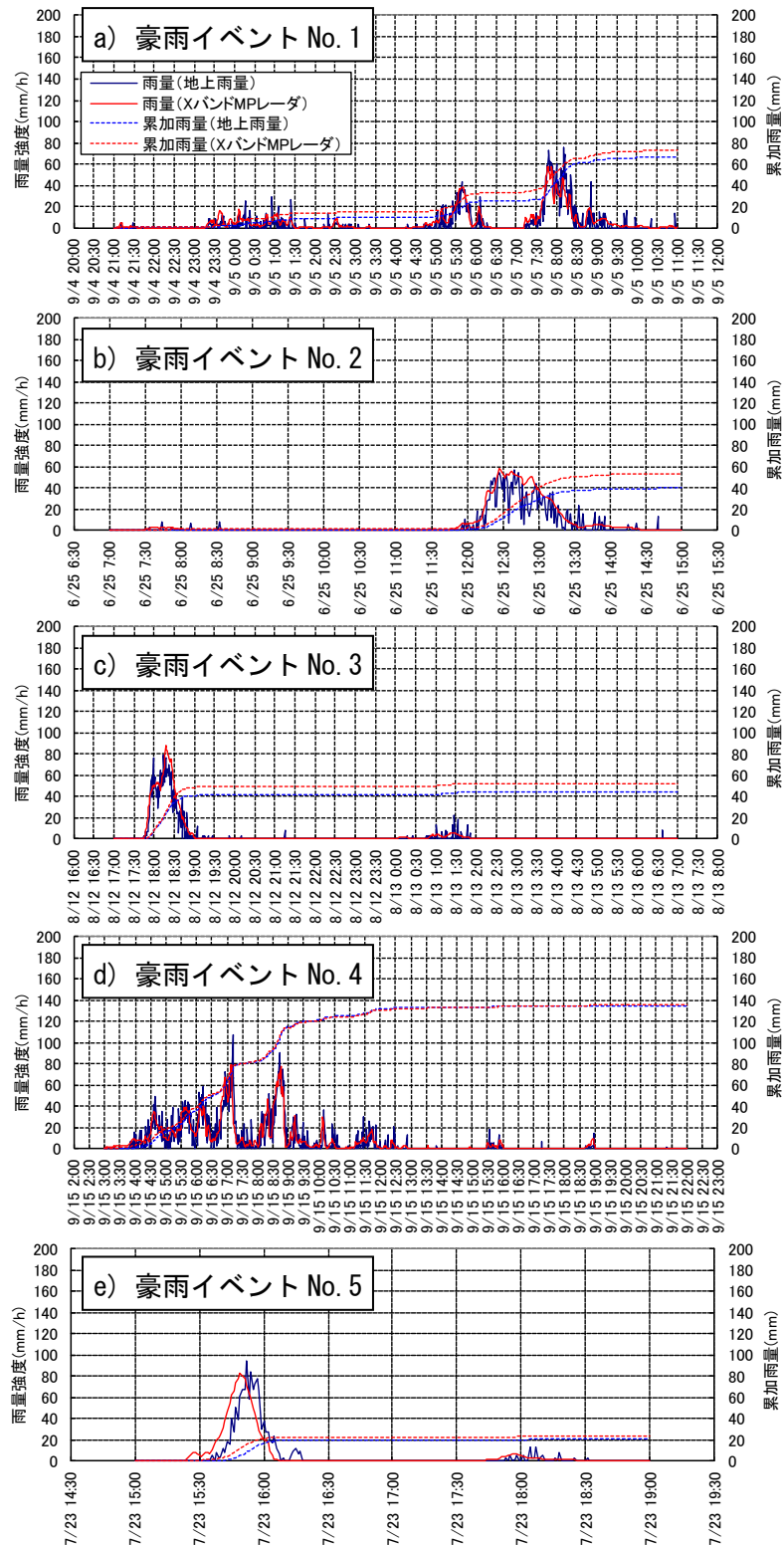


図 2-13 流域平均雨量 1 分値（地上雨量・X バンド MP レーダー）の
ハイトグラフ比較図

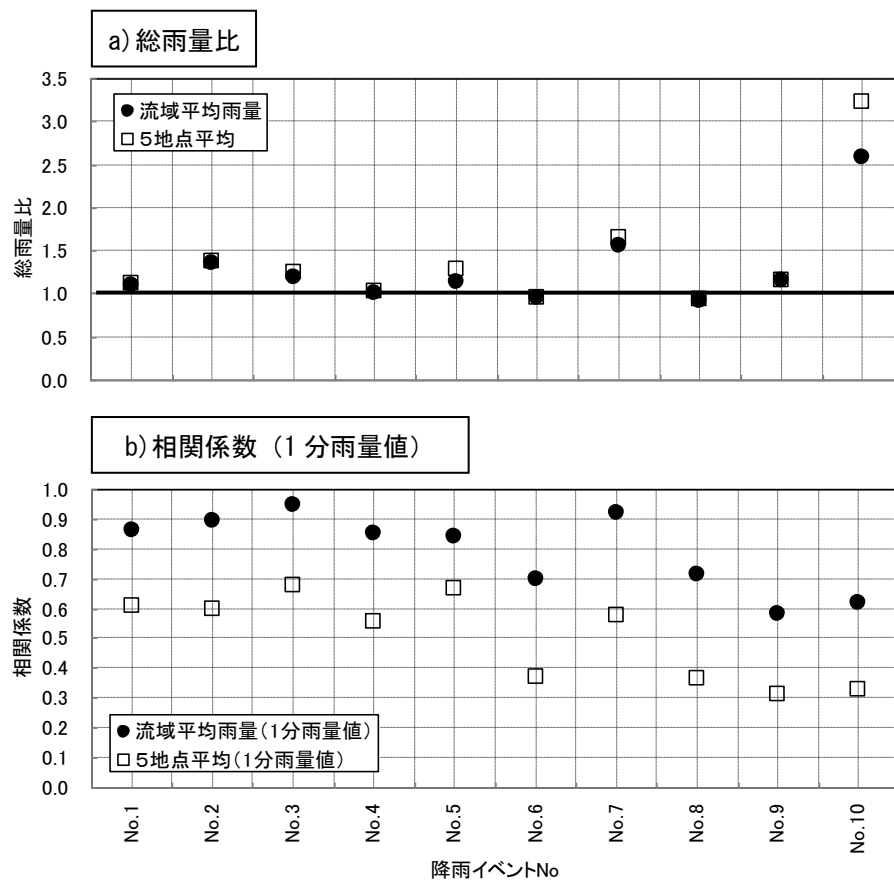


図 2-14 流域平均雨量における総雨量比（Xバンド MP レーダ雨量/地上雨量）と相関係数

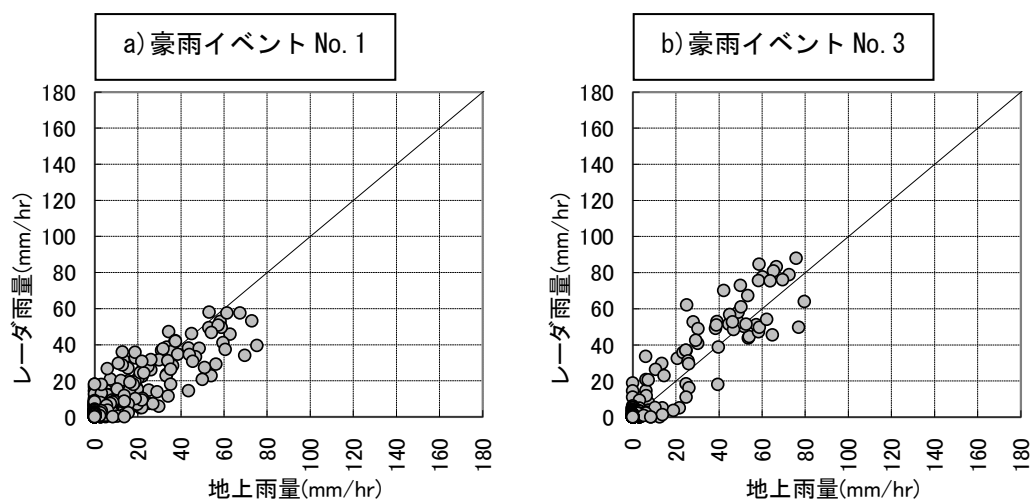


図 2-15 X バンド MP レーダと地上雨量による流域平均雨量 1 分値の散布図

なお、図 2-13 e) の豪雨イベント No.5 をみると、X バンド MP レーダ雨量は地上雨量よりも 2～3 分程度早く降雨を観測しており、降雨波形に位相差がみられる。他の豪雨イベントにおいても No.5 ほど差は顕著ではないものの、X バンド MP レーダ雨量は地上雨量より 1 分程度早い傾向が見られる。この観測時差は、レーダ観測高度から地上雨量計に到達するまでの雨滴落下時間が主要因と推測される。例えば、一般的に、X バンド MP レーダで上空 600m を観測し、観測した降雨が 50mm/h、雨滴直径 2mm 程度、落下速度は 6.6m/s とすると、地上までの落下時間は約 1.5 分となる。

しかし、豪雨イベント No.5 を詳細に調べると、図 2-16 に示すとおり流域中央部のみで雨量強度 100mm/h を超える豪雨が発生しており、非常に局所的な積乱雲と強い上昇気流の発生により、特に流域周辺部において雨滴落下時間が長くなったと推察される。なお、これら観測時差については 10 分間隔の降雨データでみた場合や流域からの流出時間で考えた場合にそれほど問題とならない場合もあるが、今後、X バンド MP レーダ雨量をより詳細な時空間情報として取り扱っていく場合には注意が必要である。

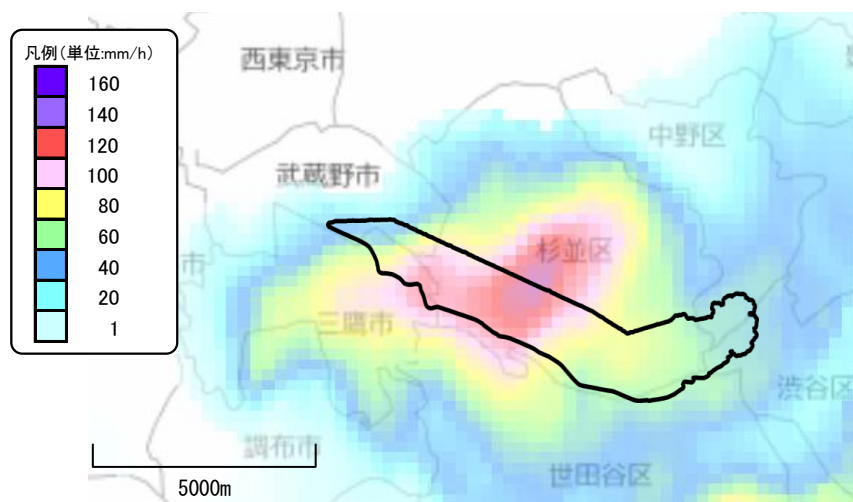


図 2-16 豪雨イベント No.5 のピーク降雨時の降雨状況 (2013/7/28 15:50)

2-4-2 10 分値データによる精度評価

これまで降雨データを評価する場合には、地上雨量データの観測時間間隔に合わせて 10 分雨量等を用いることが多いため、地上雨量および X バンド MP レーダ雨量を 10 分間隔データとした場合について精度を確認した。10 分値データは、1 分値データを元に作成した。図 2-17 には、地上雨量および X バンド MP レーダ雨量による 10 分値流域平均雨量のハイトグラフについて、豪雨イベント No.1～No.5 のうち 30 分累加雨量が最大の No.1 と総雨量が大きい No.4 を示した。これより、10 分値による両者の降雨波形は、1 分値の場合（図 2-13）と比較して相似性が高くなっている。

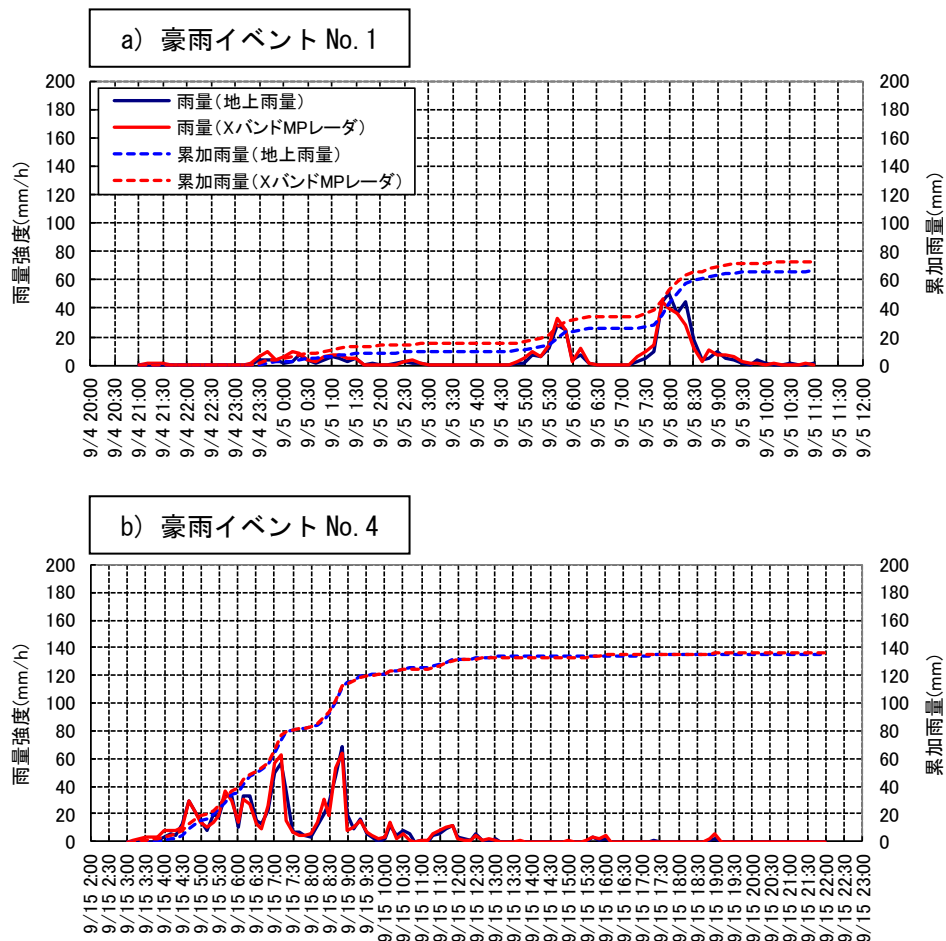


図 2-17 流域平均雨量 10 分値（地上雨量・X バンド MP レーダ）の
ハイトグラフ比較図

図 2-18 には、地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の 10 分値流域平均雨量の相関係数を、1 分値流域平均雨量の相関係数とともに示す。これより、10 分値流域平均雨量は、1 分値のそれと比較し、全ての豪雨イベントにおいて、高い相関を示す値となった。これは、10 分データを用いた場合、データが平滑化され 1 分データ（図 2-13）でみられた降雨波形の詳細な差異が認識できなくなっているためである。

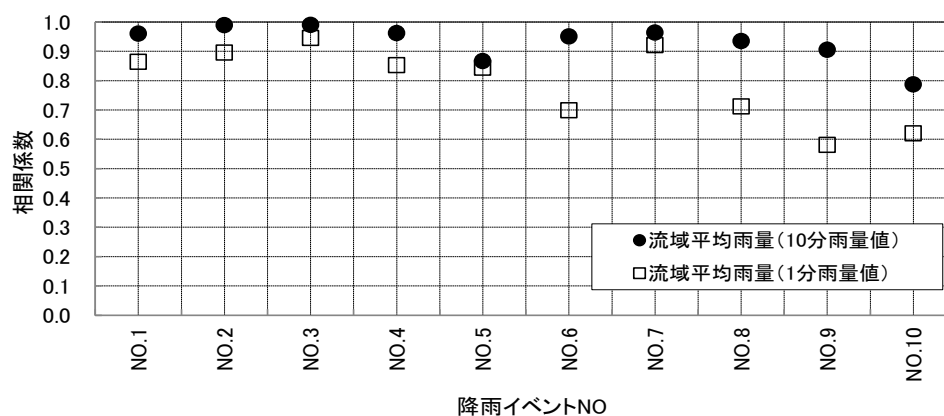


図 2-18 地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の相関係数

2-4-3 Xバンド MP レーダの 1 分値と 10 分値雨量の差異

X バンド MP レーダ雨量による 1 分値と 10 分値雨量の差異について、降雨波形からそれぞれの特徴を分析した。図 2-19 は、豪雨イベント No.1 の流域平均雨量における 2 山目期間（9/5 7:00～10:00）を示したものである。X バンド MP レーダ雨量による流域平均雨量 1 分値をみると、地上雨量と比較して約 1 分程度早く降雨を観測しており、7:50 付近のピーク雨量強度は 60mm/h 程度に対して、10 分値でみると約 45mm/h と 25% 程度低い値となっている。

次に、図 2-20 には、X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の観測時差が大きかった豪雨イベント No.5 の流域平均雨量を示した。豪雨イベント No.5 は、短時間における一山降雨波形である。流域平均雨量 10 分値では、X バンド MP レーダ、地上雨量ともにピーク雨量強度が低減しており、鋭敏な降雨波形の情報は失われていることがわかる。1 分値の X バンド MP レーダ雨量は、地上雨量と比較して、約 2～3 分程度早く降雨を観測しており、この観測時差は 10 分値でみると 10 分の差となっている。さらに、10 分値ではピーク雨量強度は約 60mm/h であり、1 分値の 80mm/h と比較して 25% 程度低く評価していることが確認できる。

豪雨イベント No.5 は、大気状態不安定に起因する降雨であり、降り始めから降り終わりまでが 30 分程度といった非常に短時間の豪雨である。都市中小河川では、このような短時間強雨による内水被害等が増加しているため、詳細な降雨波形の把握が重要であり、X バンド MP レーダ雨量 1 分値を用いることで 10 分値と比べてピーク降雨量やピーク雨量生起時刻を高い精度で把握が可能であるといえる。

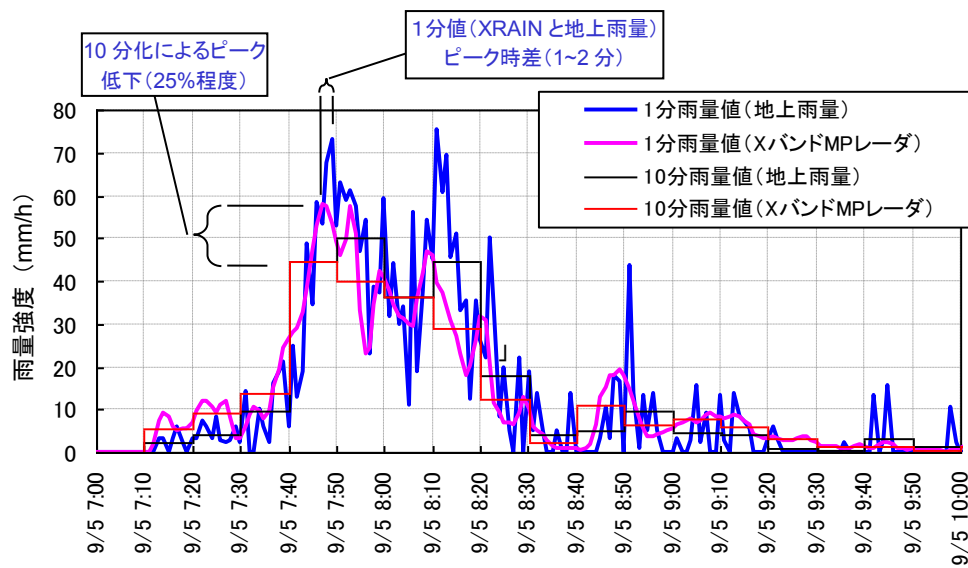


図 2-19 豪雨イベント No.1（後半）の流域平均雨量の比較図

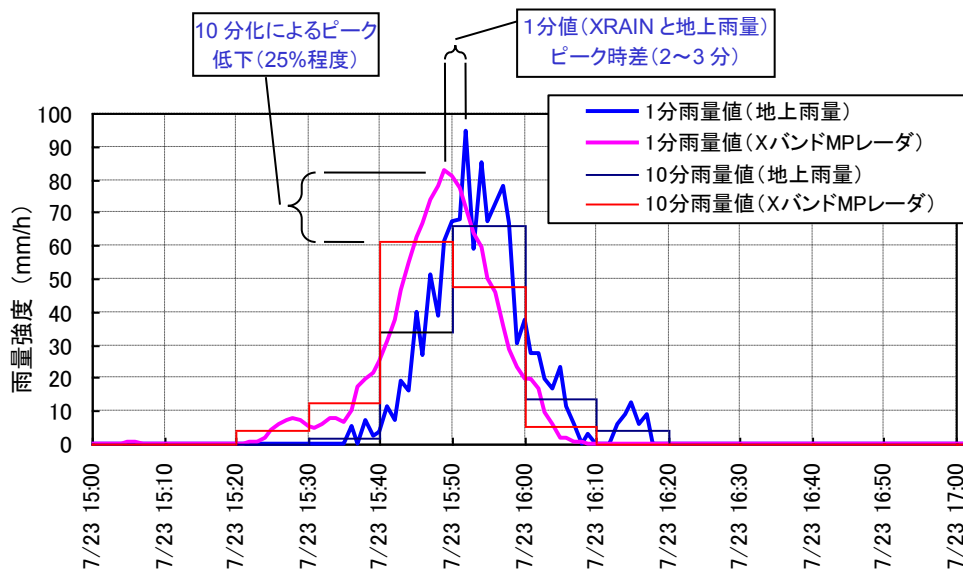


図 2-20 豪雨イベント No.5 の流域平均雨量の比較図

2-5 結語

本章では、X バンド MP レーダ雨量について、神田川上流域を対象として、高密度に配置された 1 分値地上観測雨量データを用いて精度評価を実施した。その結果、X バンド MP レーダ雨量の 1 分値データは、十分に高い精度を有しており、中小河川流域における空間分布、時間分布ともに高精度に表現可能な降雨データであることを確認した。また、10 分値データではピーク雨量およびその生起時刻を正確にとらえきれないが、X バンド MP レーダの 1 分値データを用いることでより詳細な降雨を把握することが可能である。ただし、X バンド MP レーダ雨量は、レーダ観測高度から地上雨量計に到達するまでの雨滴落下時間等による観測時差により、地上観測雨量と比較して 1～3 分程度早く降雨を観測している。また、1 分値と 10 分値のそれぞれの雨量強度をみると、10 分値雨量データは 1 分値雨量データと比較してピーク雨量強度を 3 割程度低く見積もる場合があることを確認した。

【参考文献】

- 1) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝: 地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007.
- 2) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博: 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.217-230, 2009.
- 3) 土屋修一, 川崎将生, 五道仁実: 降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良によるXRAIN観測雨量の精度向上, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.71, No.4, pp.I_457-I_462, 2015.
- 4) 林義晃, 手計太一, 山崎惟義: 北陸地方における地上雨量観測所を用いたXバンドMPレーダの降水量(降雪量)推定精度の評価, 水文・水資源学会誌, Vol.27, No2, Mar.2014, pp.67-76, 2014.
- 5) 庄建治朗, 谷口健司, 富永晃宏: 10分雨量データとXRAINデータを用いた名古屋における強雨事例の雨域特性解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_487-I_492, 2014.
- 6) 林義晃, 手計太一, 永島健, 山崎惟義: 北陸地方におけるXバンドMPレーダの降水量推定精度に関する時空間分布特性, 水文・水資源学会誌, Vol.28, No5, Mar.2015, pp.221-232, 2015.
- 7) 原田守博, 羽澄貴史: XバンドMPレーダ情報に基づく局地的短時間豪雨の雨域性状の確率論的評価, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_511-I_516, 2014.
- 8) 高堀章, 前坂剛, 三隅良平: Xバンドマルチパラメータレーダによる降雨量推定- 複数仰角PPIデータを用いた改善効果について-, 防災科学研究所報告, 第73号, 2009.
- 9) 岡田博至, 田中岳: 洪水時における降雨時系列の特性に関する研究, 平成13年度土木学会北海道支部論文報告集, 第58号, pp.350-353, 2001.

第 3 章

X バンド MP レーダ雨量の時空間特性解析

第3章 Xバンド MP レーダ雨量の時空間特性解析

3-1 緒言

第2章では、神田川上流域を対象として、1分値によるXバンドMPレーダ雨量の精度評価を実施し、XバンドMPレーダ雨量の詳細な時間分解能に関する観測精度の有効性を確認するとともに、1分値によるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量には、観測時差があることを確認した。しかし、既往の研究においては、XバンドMPレーダ雨量と地上雨量の詳細な観測時差について定量的な評価を行った事例はほとんどなく、かつ既往の研究の多くは地上雨量観測所と観測所直上メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量のハイトグラフをもとにした比較であり、観測所周辺メッシュデータを用いた豪雨を対象とした空間的な解析事例はほとんどない。また、XバンドMPレーダ雨量と地上雨量が示す時空間的な相関性については、降雨により様々な形態を示す雨域移動の影響を受けると考えられるが、雨域移動がこれらの時空間特性に及ぼす影響について検討した事例はほとんどない。

本章では、XバンドMPレーダ雨量と地上へ到達する雨量（地上観測雨量）との間に存在する時空間的な観測誤差について、第2章同様に東京都の代表的な都市中小河川流域である神田川上流域における豪雨イベントを対象に、地上雨量観測所とXバンドMPレーダ雨量の観測所周辺メッシュの降雨データをもとに、XバンドMPレーダ雨量の時空間相関特性解析を実施するとともに、移流モデルによる雨域移動特性を分析し、雨域移動特性と時空間相関特性の関係性を明らかにした。

3-2 対象地上雨量観測所および対象降雨

検証対象とする地上雨量観測所は、図 3-1 に示す東京都内の中小河川である神田川の井の頭池から善福寺川合流点までの神田川上流域（約 11.5km²）の中央に位置する池袋橋地上雨量観測所を対象とした。使用する雨量データは、東京都水防災総合情報システムによる 1 分間隔，最小単位 1mm にて計測している地上雨量を用いた。

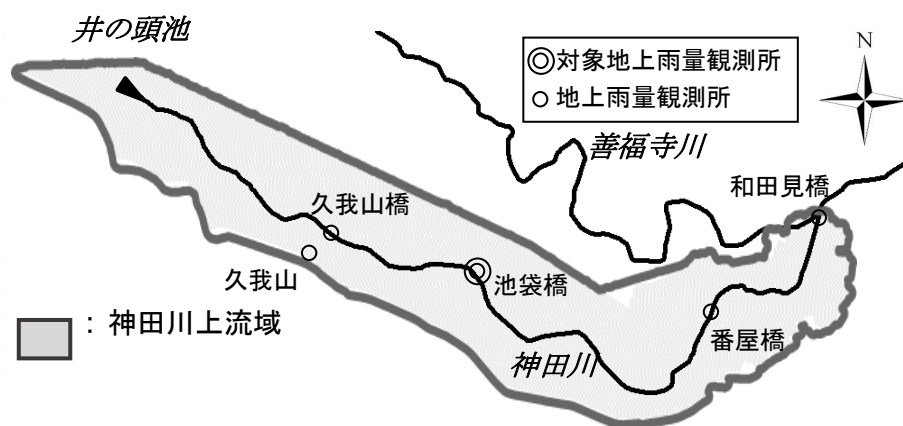


図 3-1 地上雨量観測所位置図

対象降雨は、2013 年に対象流域において発生した豪雨を対象として選定することとした。中小河川では、短時間の強降雨が河川水位を上昇させるため、対象降雨の累加期間は 30 分とし、対象観測所の 30 分累加雨量値が 25mm 以上の降雨を抽出し、その降雨期間を含み、1 時間以上の無降雨状態を伴わない一連の降雨を豪雨イベントとして設定した。表 3-1 には、対象観測所において抽出した豪雨イベント、30 分累加雨量の抽出開始時刻および 30 分累加雨量、降雨継続時間、総雨量を示した。

表 3-1 選定した検証対象 5 豪雨イベント

降雨イベント	30分累加雨量(池袋橋)		1降雨継続時間及び総雨量			検証降雨期間		時間 (hr)	降雨要因
	抽出開始時刻	雨量 (mm)	降雨開始時刻	降雨継続 時間 (min)	総雨量 (mm)	開始時刻	終了時刻		
I-1	2013/09/15_06:47	36	2013/09/15_03:58	535	144	2013/09/15_03:00	09/15_13:00	10	台風18号
I-2	2013/08/12_17:54	35	2013/08/12_17:54	51	45	2013/08/12_17:00	08/12_19:00	2	大気状態不安定
I-3	2013/06/25_12:17	31	2013/06/25_12:17	95	48	2013/06/25_12:00	06/25_14:00	2	大気状態不安定
I-4	2013/09/05_07:48	26	2013/09/05_07:41	122	39	2013/09/05_07:00	09/05_10:00	3	低気圧
I-5	2013/04/06_22:40	25	2013/04/06_15:22	599	94	2013/04/06_15:00	04/07_02:00	11	低気圧

また、図 3-2 は、豪雨イベント I-1～I-3 における地上雨量（池袋橋地点）と X バンド MP レーダ雨量のハイトグラフおよびそれぞれの累加雨量を示した。これより、地上雨量は、最小単位が 1mm であり、かつ単位を mm/h に換算しているため、X バンド MP レーダ雨量と比べて値の変動が大きく、また、第 2 章において指摘したとおり、X バンド MP レーダ雨量は、雨滴落下時間等の影響により地上雨量に対して観測が早い傾向が明確に確認される。

なお、図 3-2 c) は、後半部 13:40、13:50 付近において地上雨量で雨量強度 60mm/h の観測値がみられるが、X バンド MP レーダ雨量ではそのような観測はされていない。これは X バンド MP レーダ雨量では 4～5mm/h (=0.7～0.8mm/10min) の弱い降雨が継続しており、この降雨を地上観測データの最小単位 1mm を観測しているためパルスのように雨量が観測されている。図 3-2 e) の降雨が小さい期間にも同様の状況が確認される。

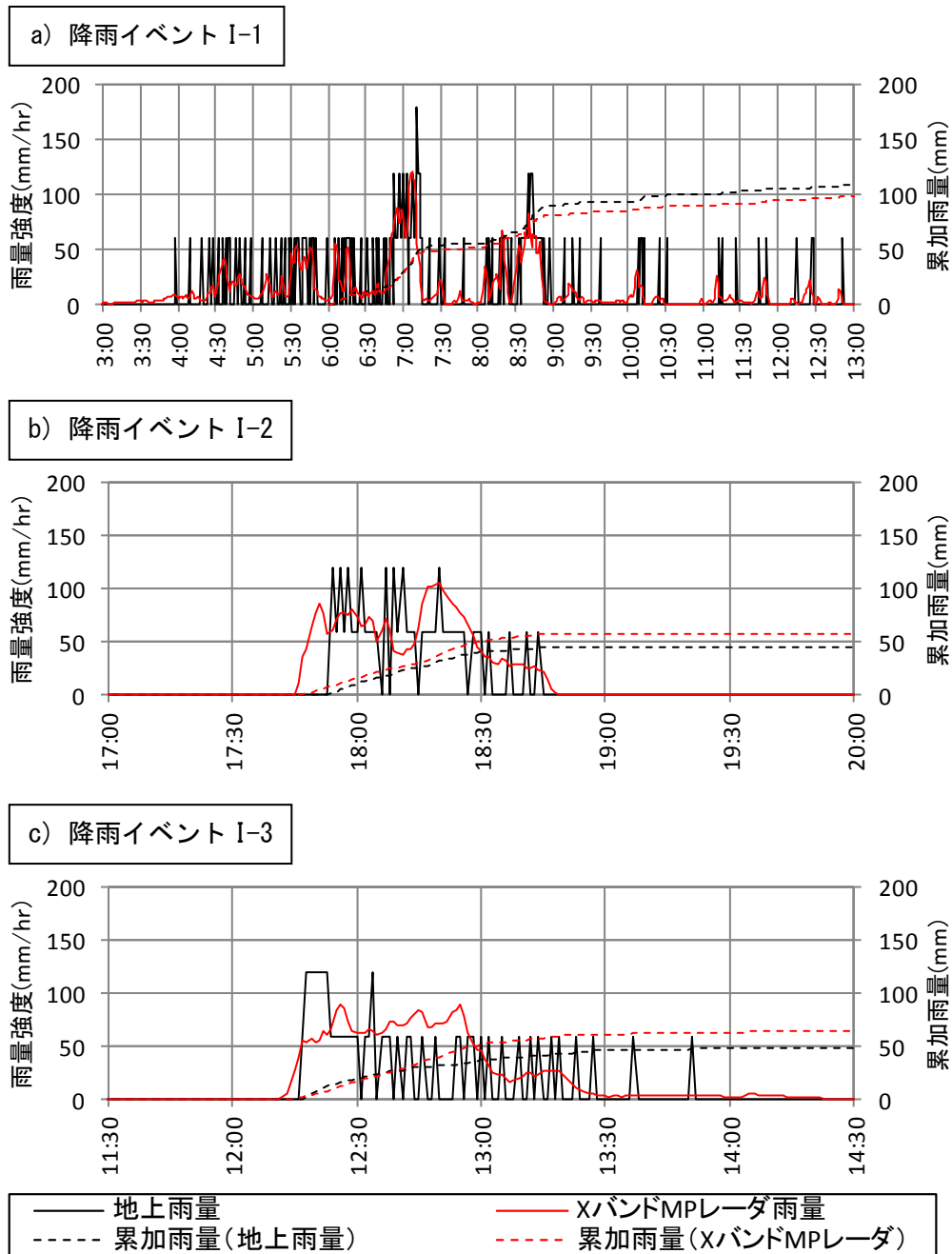


図 3-2 地上雨量と X バンド MP レーダ雨量のハイトグラフ (1)

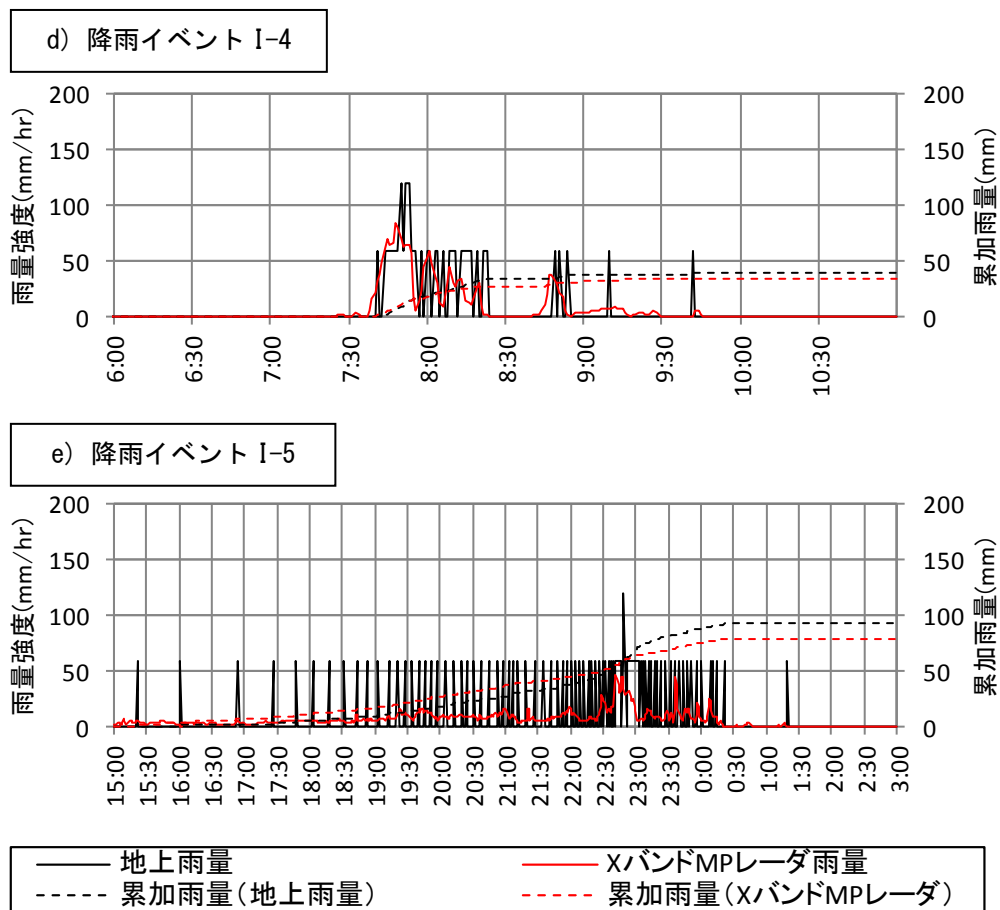
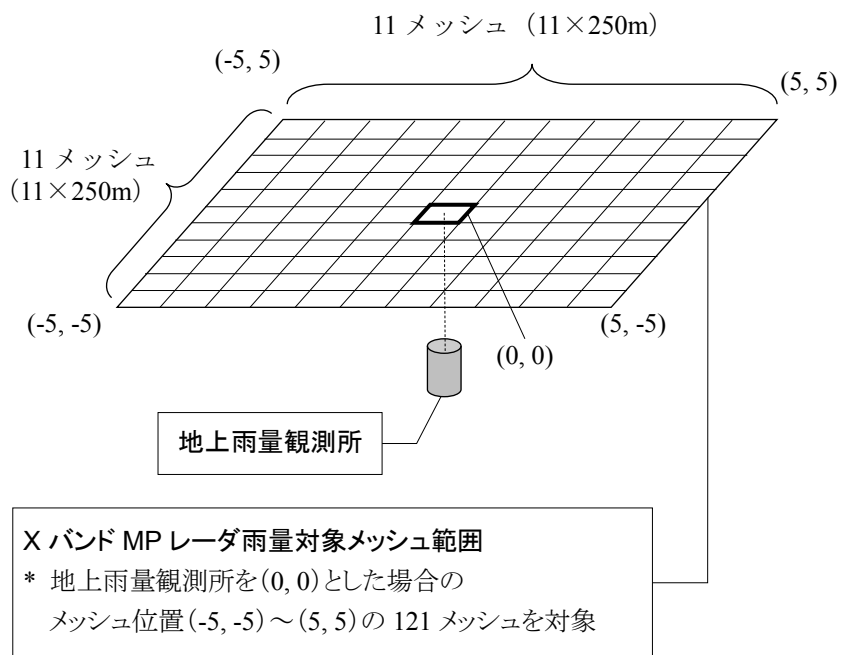


図 3-2 地上雨量と X バンド MP レーダ雨量のハイトグラフ (2)

3-3 XバンドMPレーダ雨量と地上雨量との時空間相関特性

3-3-1 時空間解析の概要

地上雨量観測所における雨量データと観測所直上およびその周辺メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量を用いて、時空間的な相関特性について検討する。検討対象範囲は、図3-3に示すとおり、地上観測所とその周辺メッシュとして、(1)時間方向の遅れ時間「-30～+30分(1分ピッチ)」と、(2)地上雨量観測所周辺メッシュにおいて、それぞれ組み合わせた場合ごとに相互相関係数を算出した。対象とする周辺メッシュ範囲は、地上観測所の直上メッシュを(0, 0)として、その周辺メッシュ(-5, -5)～(5, 5)の11×11メッシュ=121メッシュとした。XバンドMPレーダ雨量は、250mメッシュの詳細な空間分解能を有しており、対象とするエリアは、11×11メッシュ=約2.75km×2.75km範囲となる。なお、今回使用する地上雨量は、1分間隔、最小単位1mmによる観測値であり、この量子化誤差によって全体的に相関係数が低めとなっていると推測される。



- (1) 時間解析：遅れ時間-30 分～+30 分（1 分ピッチ）を設定
- (2) 空間解析：観測所周辺メッシュ（11×11 メッシュ範囲）における地上雨量との相関係数の算定（(1)の遅れ時間ごとに算定）

図 3-3 地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の時空間解析の概要

遅れ時間は、図 3-4 に示すとおり通常の X バンド MP レーダ雨量を遅れ時間 $\tau=0$ の波形として、この $\tau=0$ の降雨波形に対しての時刻差を遅れ時刻として定義する。遅れ時間は「-30～30 分（1 分ピッチ）」を設定し、各遅れ時間における相関係数を算定している。

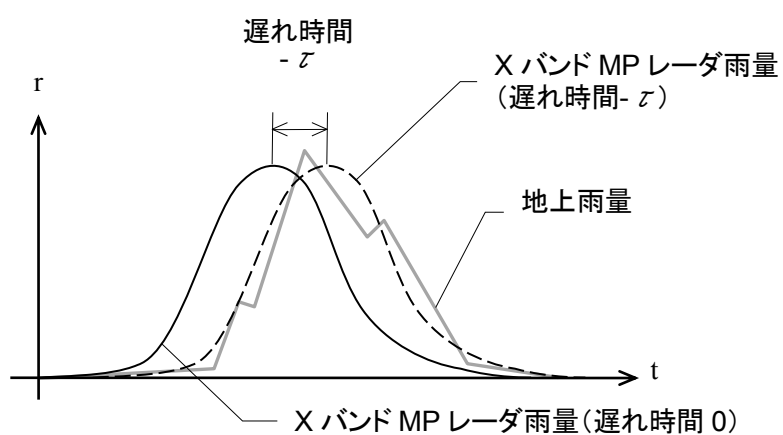
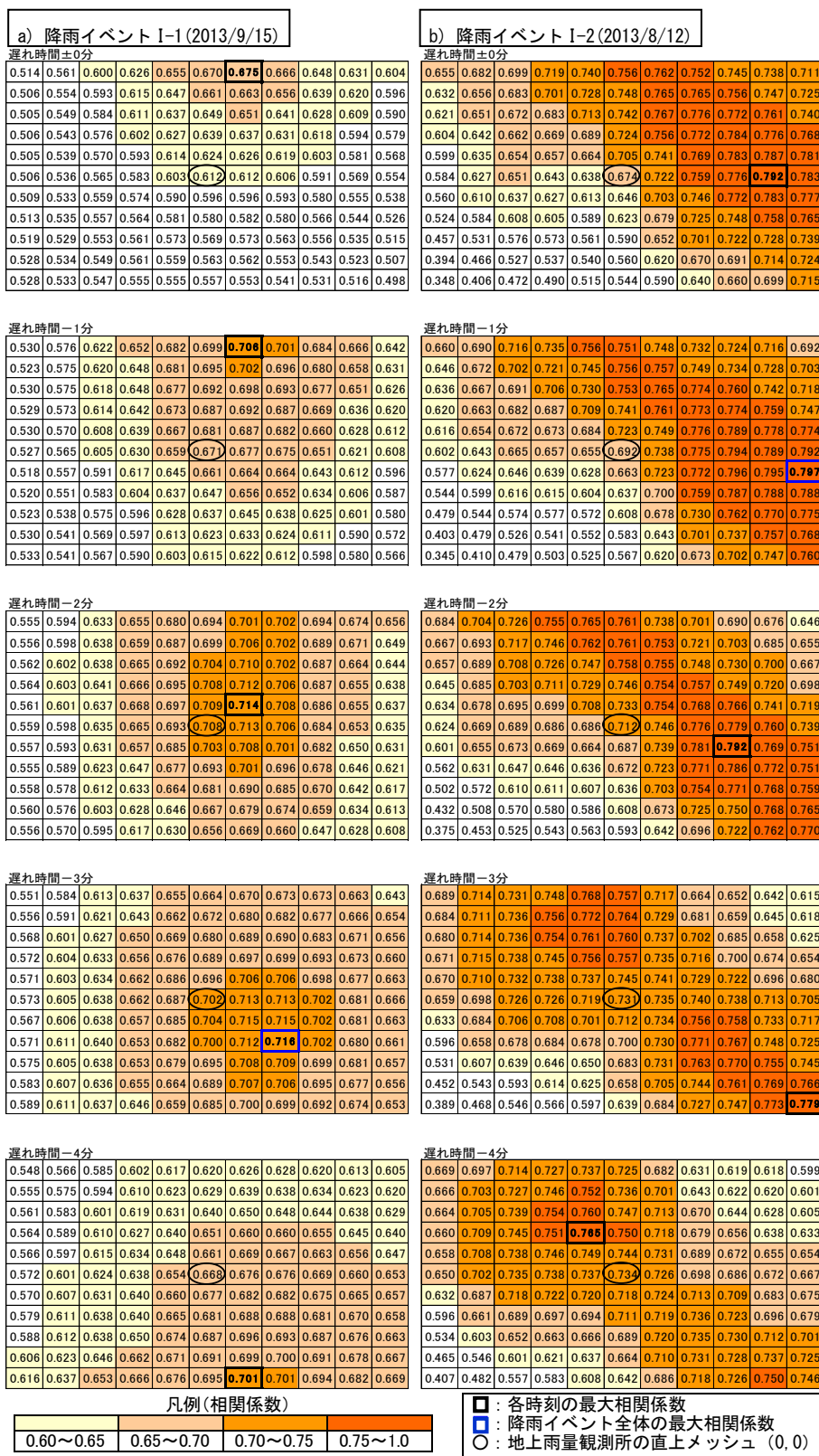


図 3-4 地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の遅れ時間 τ の概念

3-3-2 観測所直上メッシュと周辺メッシュにおける時空間相関特性

図 3-5 は、地上雨量と観測所周辺メッシュ（11×11 メッシュ範囲）における X バンド MP レーダ雨量の相関係数の空間分布を、遅れ時間「0 分～-4 分」について示したものである。これより、相関係数の最大値をみると豪雨イベント I-1 で遅れ時間-3 分の時に 0.716、豪雨イベント I-3 で遅れ時間-3 分の時に 0.763、豪雨イベント I-4 で遅れ時間-1 分の時に 0.773 であり、最大相関係数は時空間的に変化している。



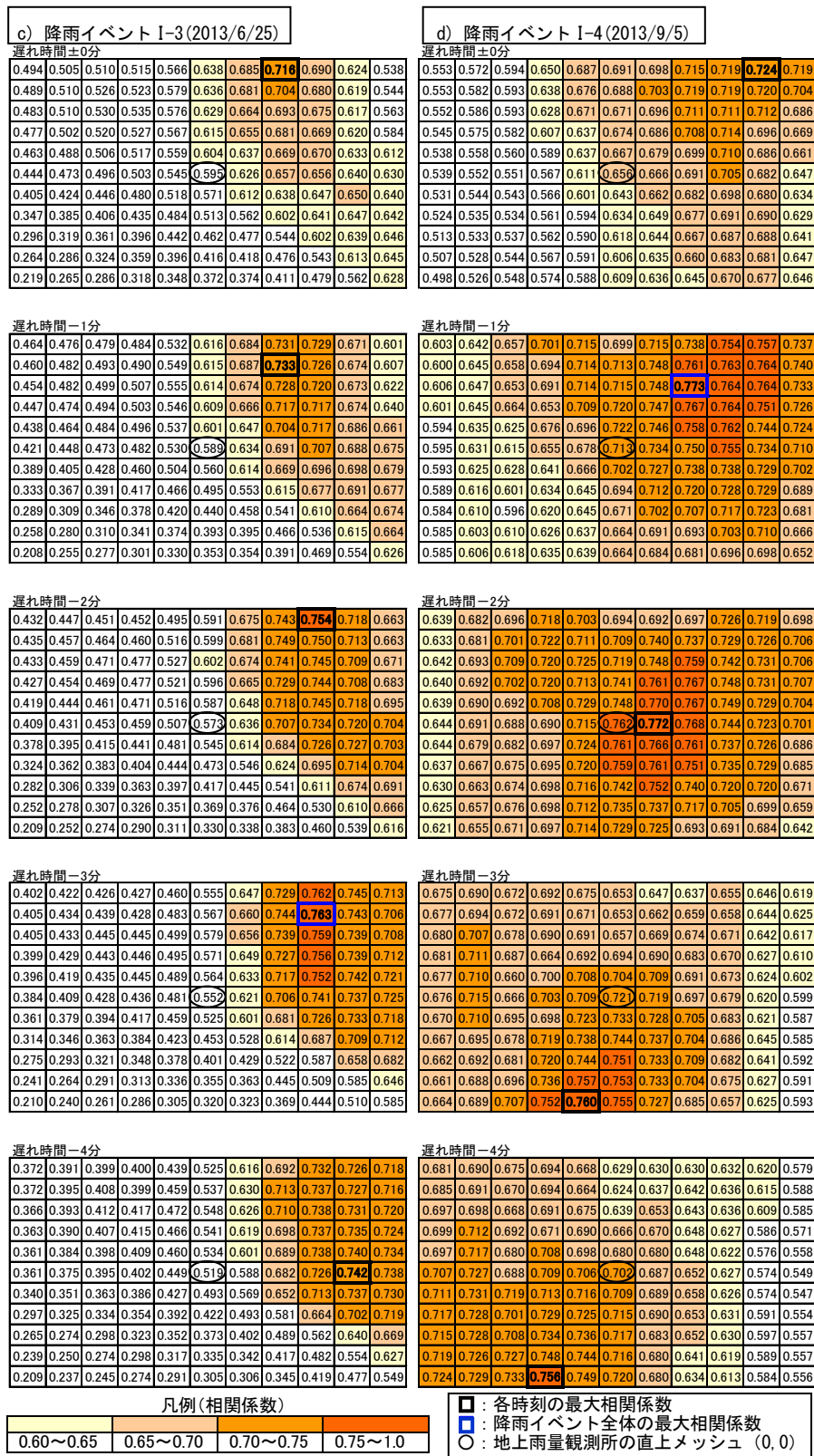


図 3-6 は、遅れ時間ごとの地上雨量と観測所直上メッシュの X バンド MP レーダ雨量の相関係数と、地上雨量と観測所周辺メッシュ（11×11 メッシュ範囲）の X バンド MP レーダ雨量の最大相関係数を、それぞれ黒丸と実線で示したものである。図 3-6 a), d) は、台風もしくは低気圧に起因する豪雨イベント I-1, I-4 について示したものであり、観測所直上および観測所周辺メッシュにおける最大相関係数の差は、それぞれ「 $0.716-0.708=0.008$ 」「 $0.773-0.762=0.011$ 」と小さい。一方、図 3-6 b), c) は、大気状態不安定に起因する豪雨イベント I-2, I-3 について示したものであり、観測所直上と観測所周辺メッシュにおける最大相関係数の差は、それぞれ「 $0.797-0.734=0.063$ 」, 「 $0.763-0.595=0.168$ 」と豪雨イベント I-1, I-4 と比べて大きい値となっている。

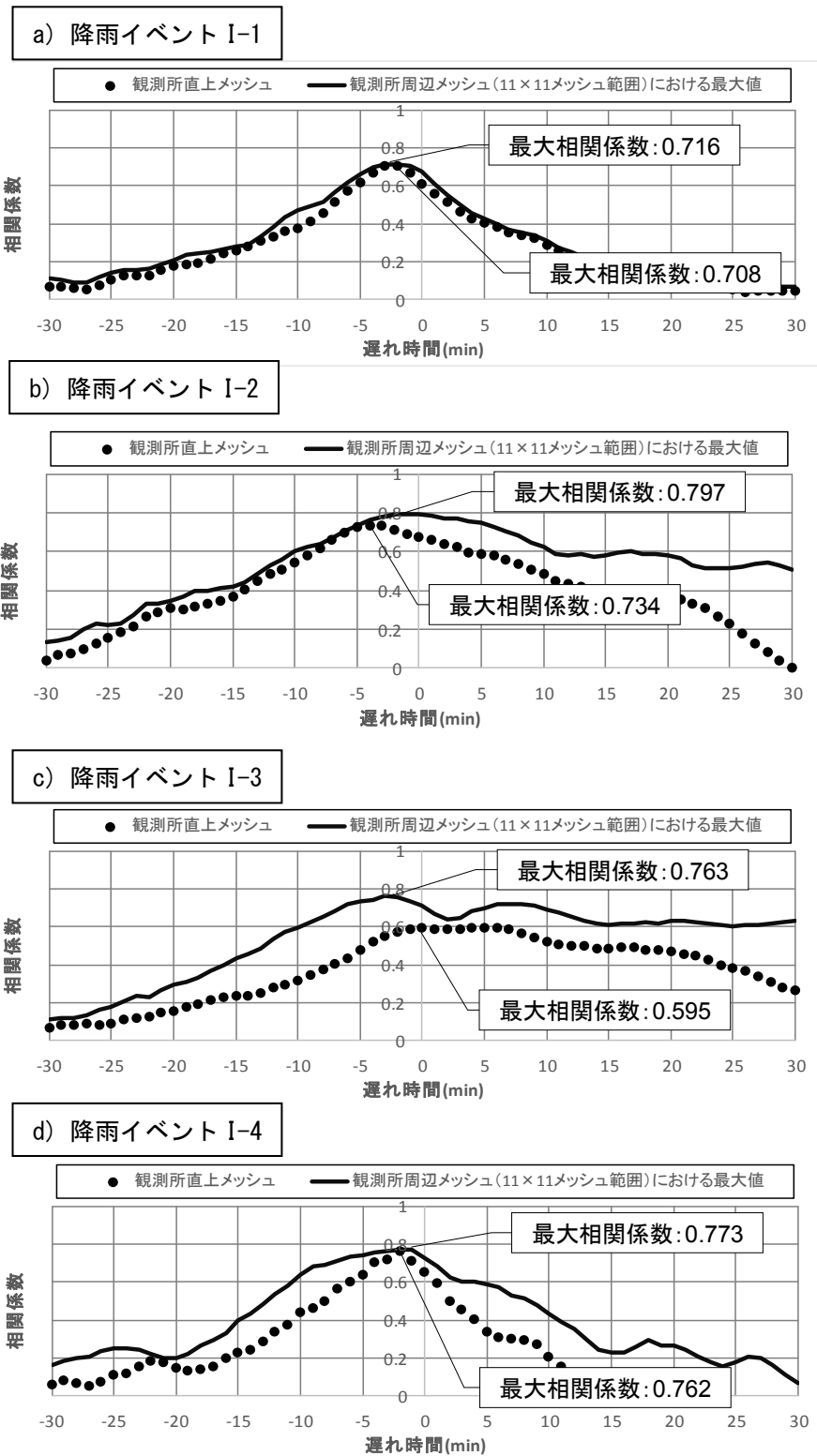


図 3-6 観測所直上メッシュと観測所周辺メッシュにおける X バンド MP レーダ雨量と
地上雨量との最大相関係数

表 3-2 は、観測所直上メッシュにおける X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の最大相関係数とその遅れ時間、観測所周辺メッシュ（11×11 メッシュ範囲）における X バンド MP レーダ雨量と地上雨量の最大相関係数とその遅れ時間およびメッシュ位置について、豪雨イベント別に示したものである。また、観測所直上メッシュおよび観測所周辺で最大相関係数となるメッシュ位置における総雨量比（X バンド MP レーダ総雨量／地上雨量総雨量）も併せて示した。これより、観測所周辺メッシュにおける最大相関係数は、前述のとおり特に豪雨イベント I-3 では、観測所直上メッシュにおける値と比べてその差が大きい。また、観測所直上メッシュにおける総雨量比をみると、豪雨イベント I-2, I-3 では、総雨量比がそれぞれ 1.28, 1.35 であり比較的大きい値であるが、観測所周辺メッシュにおける総雨量比でみるとそれぞれ 1.07, 1.03 と 1.0 に近い値となっている。すなわち、大気状態不安定に起因する豪雨イベント I-2, I-3 では、相関係数および総雨量比が 1.0 に近いメッシュは、観測所直上メッシュではなく周辺メッシュに存在していると考えられる。また、最大相関係数となる遅れ時間をみると観測所直上メッシュ、周辺メッシュともに平均で-2 分程度となっている。

表 3-2 観測所直上メッシュおよび観測所周辺メッシュにおける X バンド MP レーダ雨量と地上雨量との最大相関係数とその遅れ時間
および総雨量比

地点名	降雨 イベント名	観測所直上メッシュ			観測所周辺メッシュ(11×11メッシュ範囲)			
		最大相関係数	遅れ時間(min)	総雨量比 ^{*1}	最大相関係数	遅れ時間(min)	メッシュ位置	総雨量比 ^{*1*2}
池袋橋	I-1	0.708	-2	0.945	0.716	-3	(2 , -2)	0.944
	I-2	0.734	-4	1.283	0.797	-1	(5 , -1)	1.073
	I-3	0.595	0	1.350	0.763	-3	(3 , 4)	1.033
	I-4	0.762	-2	0.883	0.773	-1	(2 , 3)	0.879
	I-5	0.437	-2	0.836	0.500	-2	(5 , 1)	0.881

*1 (総雨量比)=(XバンドMPレーダ総雨量)／(地上雨量総雨量), *2 メッシュ位置におけるXバンドMPレーダ雨量による総雨量比

次に、相関係数の時空間分布について図 3-5 をみると、図 3-5 a) では、遅れ時間が増加するにしたがって、最大相関係数となるメッシュ位置が北上しており、概ね 3~4 メッシュ/min 程度で移動していることが確認できる。また、図 3-5 d) も、同様に相関係数の高いエリアは北東方向に、概ね 3~5 メッシュ/min 程度で移動している。

一方で、図 3-5 b), c) をみると、遅れ時間により相関係数高いメッシュが移動するような明確な傾向は確認できない。これは、図 3-5 a), d) は、台風もしくは低気圧に起因する降雨であり、雨域の移動による影響を受け、相関の高いメッシュも移動しているためと推察される。

なお、豪雨イベントI-3については、観測所直上メッシュにおける最大相関係数0.595と比べて、観測所周辺メッシュにおける最大相関係数は0.763であり、値が大きく増加している。図3-7は、豪雨イベントI-3における降雨の状況について、メッシュ雨量図および流域内の雨量縦断図を示したものである。当該降雨は、大気状態不安定に起因しており流域内には強雨域が存在している。図3-8は、XバンドMPレーダ雨量について観測所直上メッシュ(0,0)と最大相関係数となるメッシュに近接するメッシュ(3,4)位置のハイトグラフを示したものである。図3-8をみると、約4メッシュ（約1000m）の空間位置の違いにより降雨波形は大きく異なっており、豪雨イベントI-3のような大気状態不安定に起因する集中豪雨では、空間的な差が明確に表れることがわかる。

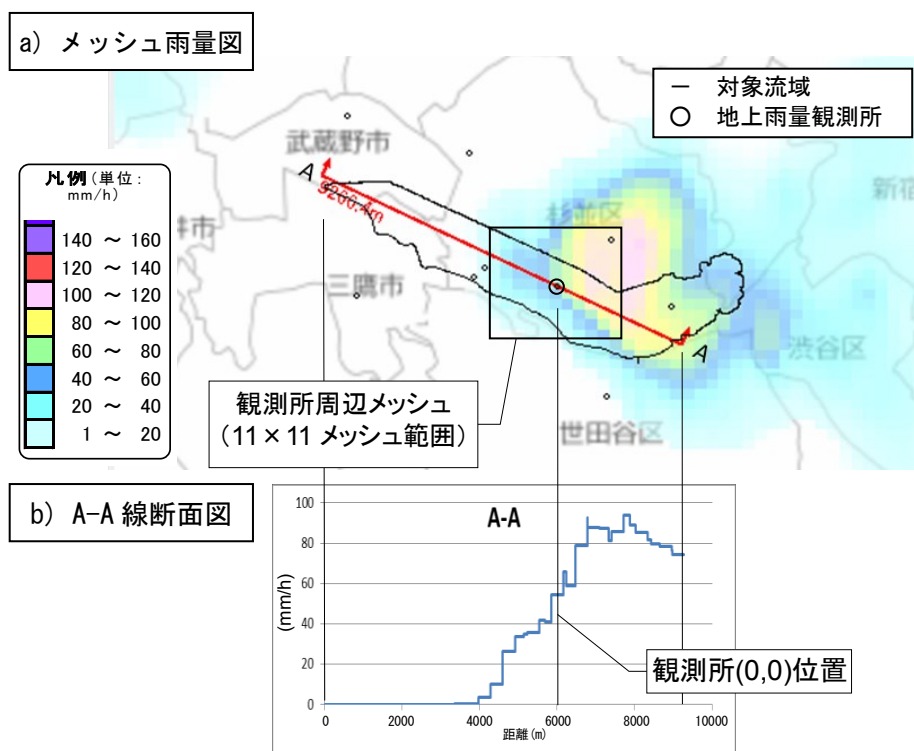


図 3-7 X バンド MP レーダ雨量状況 (豪雨イベント I-3 6/25 12:18 時点)

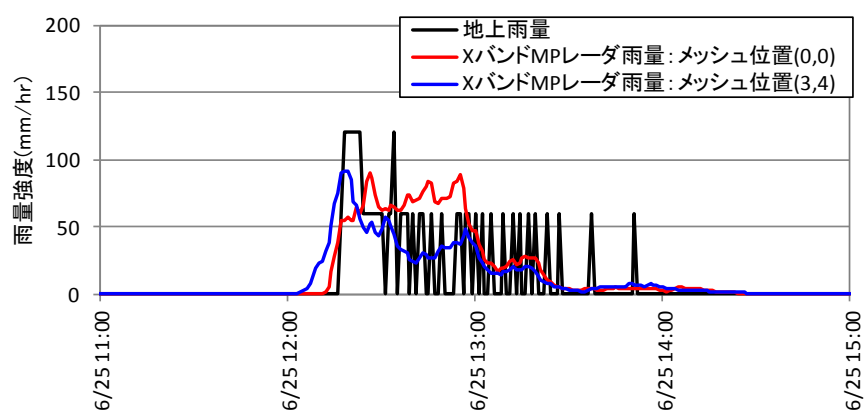


図 3-8 X バンド MP レーダ雨量メッシュ位置(0,0)および(3,4)におけるハイエトグラフ (豪雨イベント I-3, 遅れ時間 $\tau=0$)

3-4 雨域移動特性の分析

3-4-1 X バンド MP レーダ雨量による降雨移動特性

X バンド MP レーダ雨量の時系列データを用い、移流モデル¹⁾による移流ベクトルを解析した。移流モデルは、X バンド MP レーダ雨量におけるメッシュ座標 (x, y) における時刻 t の降雨強度分布を $Z(x, y, t)$ として、 Z は式(1)の移流方程式に従うものとし、移動ベクトル (u, v) は、座標の一次関数として定義する。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} = w, \quad \begin{aligned} u &= C_1 x + C_2 y + C_3 \\ v &= C_4 x + C_5 y + C_6 \\ w &= C_7 x + C_8 y + C_9 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 u, v は移動ベクトルの x, y 成分、 w は発達衰弱項であり、 $C_1 \sim C_9$ はパラメータである。

図 3-9 は、観測所直上メッシュにおけるピーク雨量付近の X バンド MP レーダ雨量の 1 分ピッチの時系列画像と、移流ベクトル算出結果を重ねて示したものである。これより、図 3-9 a), d), e) は、台風もしくは低気圧に起因する豪雨イベントであり、南から北方向への雨域の移動が確認できる。特に豪雨イベント I-1 では、120mm/h を超える強雨域が存在しており、この雨域が 2~4 メッシュ/min 程度の速度で北上している。それに対して、図 3-9 b), c) は、大気状態不安定による豪雨イベントであり、雨域の移動については明確な方向性を持っておらず、積乱雲等の発達・衰弱による影響を強く受け、強雨域の発生箇所が変化している様子がうかがえる。

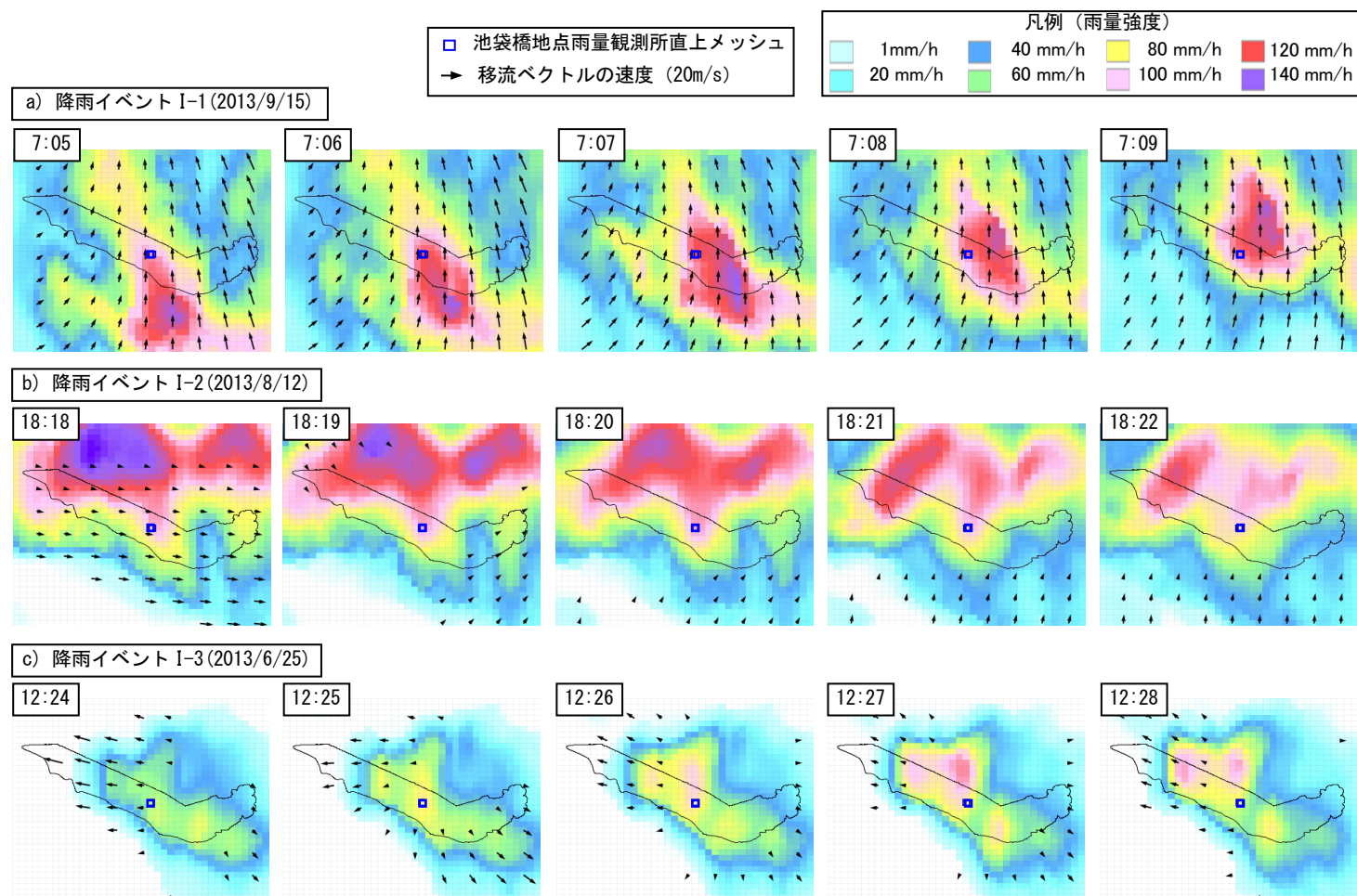


図 3-9 Xバンド MP レーダメッシュ雨量および移流ベクトル (1 分ピッチ) (1)

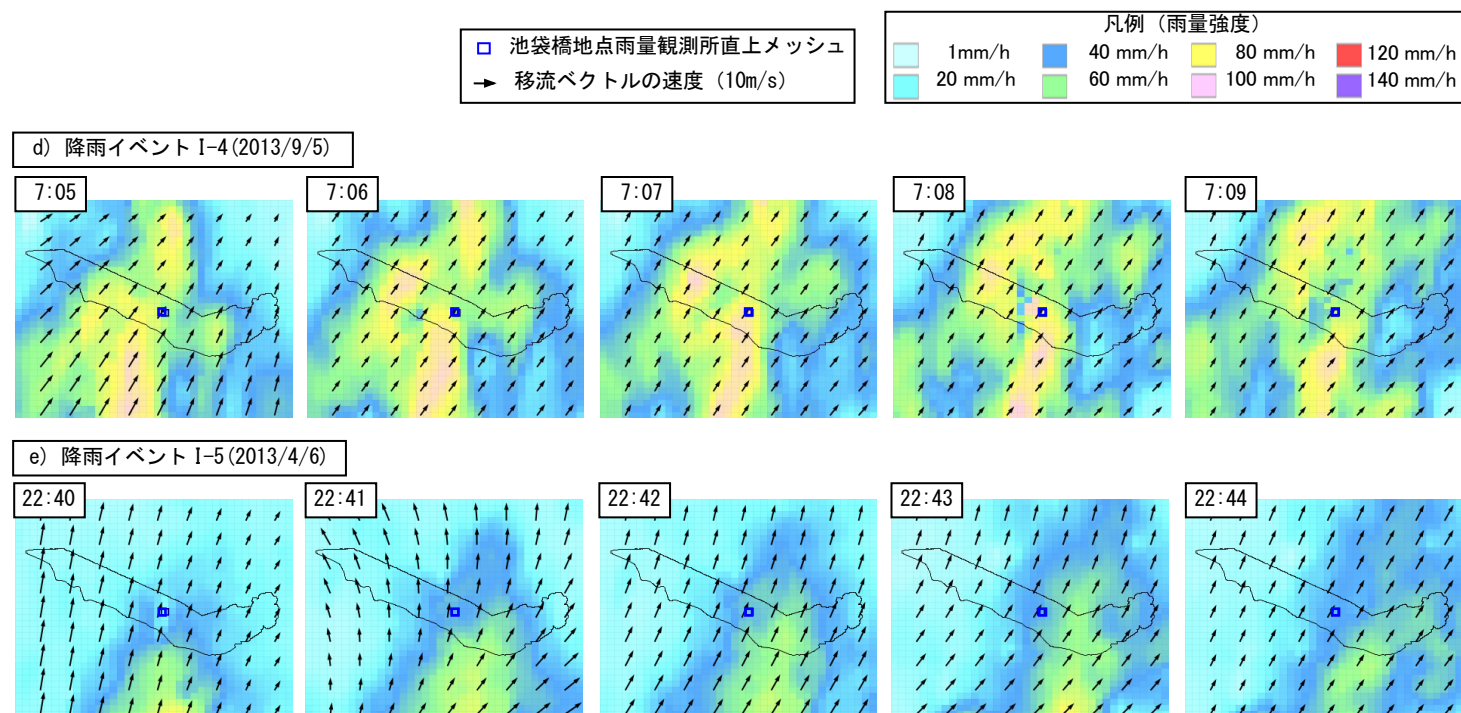


図 3-9 X バンド MP レーダメッシュ雨量および移流ベクトル (1 分ピッチ) (2)

3-4-2 移流ベクトルの方向および速度

図 3-10 は、観測所直上メッシュにおけるピーク雨量生起時刻前後 10 分間における移流ベクトルの方向および速度を 1 分ピッチで示したものである。これより、豪雨イベント I-1,I-4,I-5 では、一様方向への雨域移動が確認でき、豪雨イベント I-1,I-5 では雨域の移動方向は北方向であり、その移動速度は約 10～15m/s 程度、豪雨イベント I-4 では、移動方向は北東方向であり、速度は約 10～15m/s 程度である。また、豪雨イベント I-2,I-3 をみると、比較的短い時間内にもかかわらず移動方向は様々に変化しており、かつ速度も比較的小さく、雨域の明確な移動傾向は確認できない。

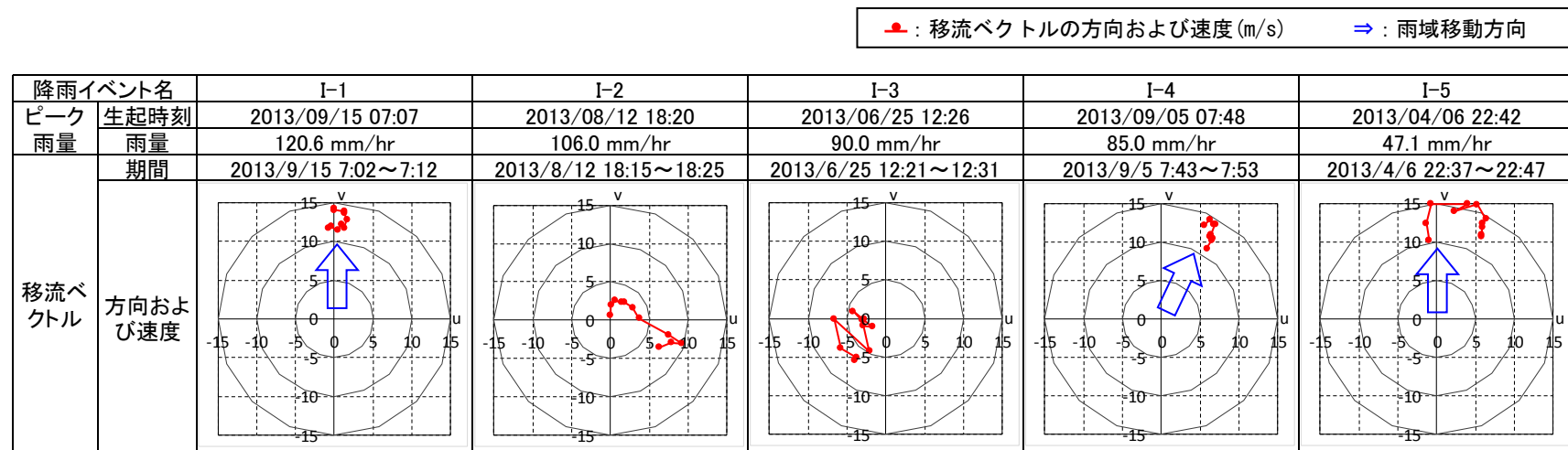


図 3-10 観測所直上メッシュにおける移流ベクトルの方向および速度（1分ピッチ）

ここで、参考として明確な雨域の移動傾向が確認できなかった豪雨イベント I-2 について詳細な降雨状況を確認した。

図 3-11 に豪雨イベント I-2 のハイトグラフを示す。これより X バンド MP レーダ雨量の降雨波形をみると、1 イベント期間中に 17:50～18:00 付近（期間 1）と 18:10～18:20 付近（期間 2）の 2 つのピークあることが確認できる。

図 3-12 は、この期間 1 および期間 2 のピーク期間付近におけるレーダメッシュ雨量図を示したものである。これより、豪雨イベント I-2 は、対象流域の南側にある降水セルが北上して流域を縦断した後、対象流域の北側で発生した降水セルと結合し、その後セルは発達、分裂を伴いながら対象流域を南下している。これより、1 豪雨イベント内において 2 つの降水セルによって豪雨を発生させているため、降水セルが北上し他の降水セルと結合するまでの期間 1 と、その後南下し雨域が対象流域を通過するまでの期間 2 で空間的な相関特性が変化していることが推定される。

すなわち、このような大気状態不安定による対流性降雨などの場合には、積乱雲等の発達・衰弱の影響が卓越し、移動特性もこれらの影響に支配されるため、1 豪雨イベント中にも特定の移動傾向は見られず、移動方向は様々に変化しているものと推察される。

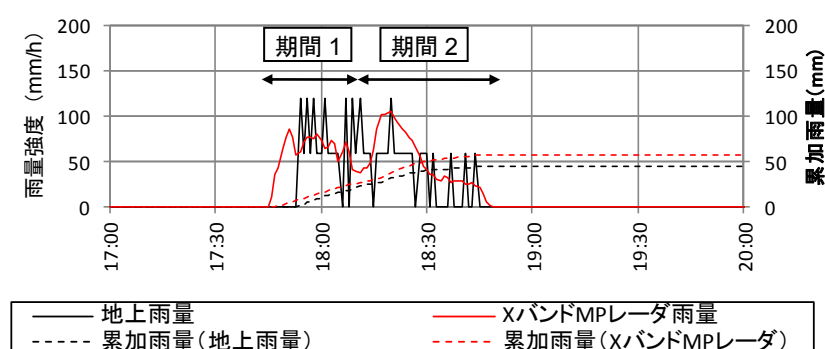


図 3-11 ハイトグラフ（豪雨イベント I-2）

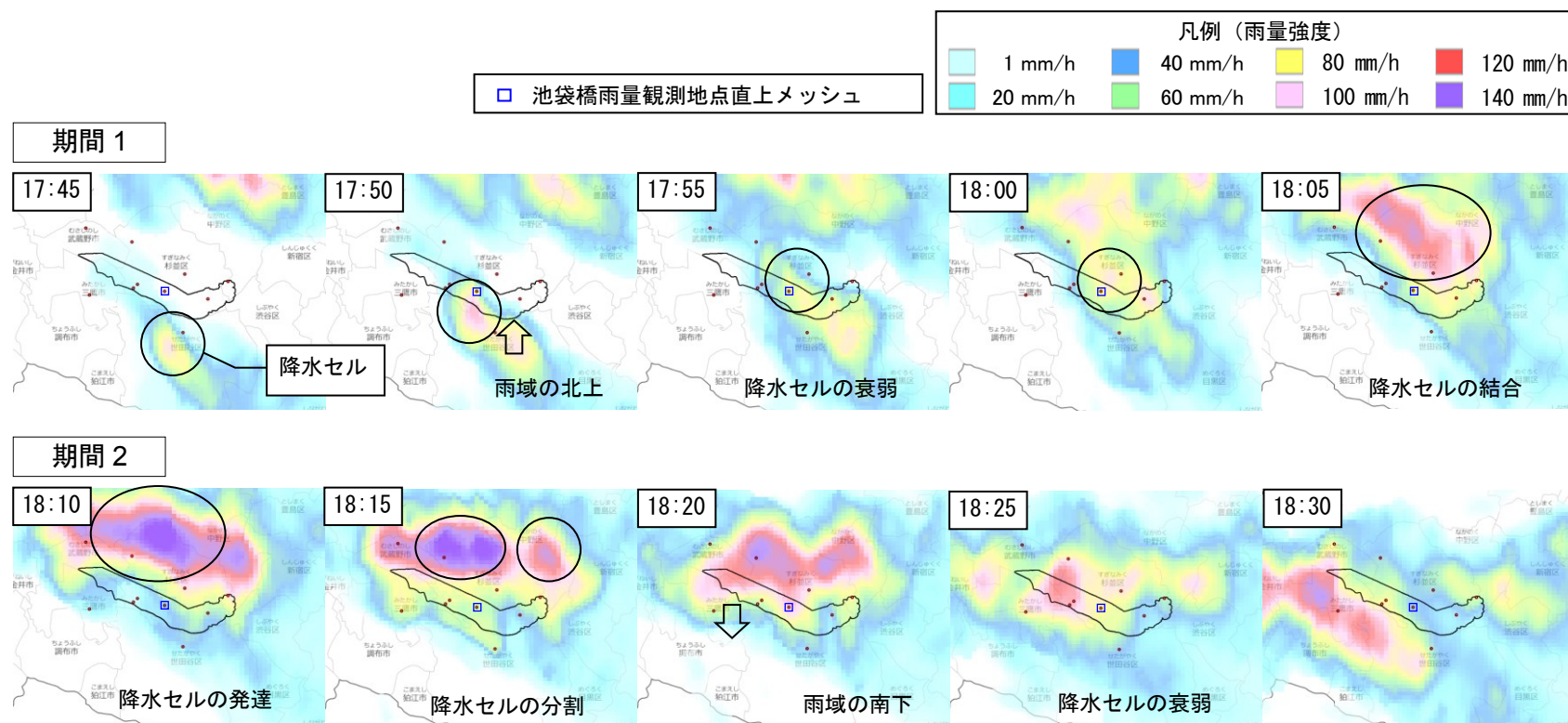


図 3-12 Xバンド MP レーダメッシュ雨量図（豪雨イベント1-2）

3-5 結語

本章では、神田川上流域の池袋橋観測所の1分値地上雨量データを用いて、XバンドMPレーダ雨量の時空間特性解析を実施した。観測所直上メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量との相関係数の比較より、XバンドMPレーダ雨量は地上雨量に対して、遅れ時間-2分程度を見込むことで最大相関係数となることがわかった。また、地上雨量データと観測所周辺メッシュにおけるXバンドMPレーダ雨量を用いた時空間解析により、必ずしも観測所直上メッシュでなく周辺メッシュ範囲におけるXバンドMPレーダ雨量と地上雨量の相関性が高いことを示した。特に集中豪雨のような強雨域がある場合は、地上雨量との比較に観測所直上のXバンドMPレーダ雨量を用いると相関係数を過小評価する恐れがあることを示した。

次に、XバンドMPレーダ雨量を用いた移流モデルによる雨域移動特性を分析し、雨域移動特性と時空間相関特性の関係性を明らかにした。台風や低気圧に起因する降雨では、雨域移動方向および速度により、地上雨量とXバンドMPレーダ雨量との相関の高いメッシュが時空間的に移動することが確認された。また、このような特定方向への広範囲の雨域移動がみられる場合、XバンドMPレーダ雨量は、遅れ時間を数分見込んだ上で、観測所直上メッシュを用いることで、地上雨量と高い相関性を確保することが可能であることを示した。

一方、大気状態不安定による局所的な集中豪雨等の場合、積乱雲等の発達・衰弱の影響が卓越し、相関性の高いエリアは特定の時空間的な移動傾向は現れにくい。これは、地上付近に強い上昇気流や局地的な強風が吹き、このような風場の変動に影響を受けて相関性の高いメッシュが移動していると推察され、地上雨量とXバンドMPレーダ雨量の相関性は、観測所直上メッシュではなく1km程度範囲の周辺メッシュで相関性が高くなることが確認された。また、このような豪雨では、1豪雨イベント中にも特定の移動傾向は見られず、移動方向は様々に変化しているものと推察される。

【参考文献】

- 1) 椎葉充晴，高棹琢馬，中北英一：移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討，水理講演会論文集, pp.423-428, 1984.

第 4 章

USF モデルによる豪雨流出特性

第4章 USF モデルによる豪雨流出特性

4-1 緒言

X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析を実施する際には、X バンド MP レーダ雨量の詳細な時空間分解能が流出ハイドログラフの再現性に与える影響を把握しておくことが重要となる。1 章に述べたとおり、X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析に関する既往の研究では、X バンド MP レーダ雨量の詳細な雨量データを用いることにより流出解析の精度がどのような影響を受けるのかについては明らかにされておらず、流出ハイドログラフにおける再現性（Reproducibility）という観点から検討した事例も見受けられない。

本章では、東京都の代表的な都市中小河川流域である神田川上流域における豪雨イベントを対象とし、都市の流出機構を考慮した集中型概念モデルである USF (Urban Storage Function) モデル¹⁾を用いて、1 分値 X バンド MP レーダ雨量およびアメダス雨量、水防災システムによる地上雨量、さらに時空間的な相関特性により補正した補正 XRAIN の 4 種類の雨量データを対象とした流出解析を実施し、降雨データの差異が流出ハイドログラフの再現性に与える影響について検証する。

なお、本章では、集中型概念モデルである USF モデルを用いて、降雨種類別に流出ハイドログラフの再現性への影響を明確にし、流出ハイドログラフの再現性を確保するためにどの降雨が優位であるかを比較することを目的としている。X バンド MP レーダ雨量の有する流域内の空間分布の影響については、X バンド MP レーダ雨量と同一メッシュサイズによる分布型流出モデルを用いた検討を、次章にて実施している。

4-2 対象流域および対象豪雨

本章では，流出解析による流出ハイドログラフの検証を実施するため，前章の対象流域である神田川上流域における水位・流量観測所を選定する．具体的には，図 4-1 に示す神田川上流域の向陽橋地点を流出ハイドログラフ再現性の検証地点とし，向陽橋地点の上流域約 7.7km² を対象流域とした．

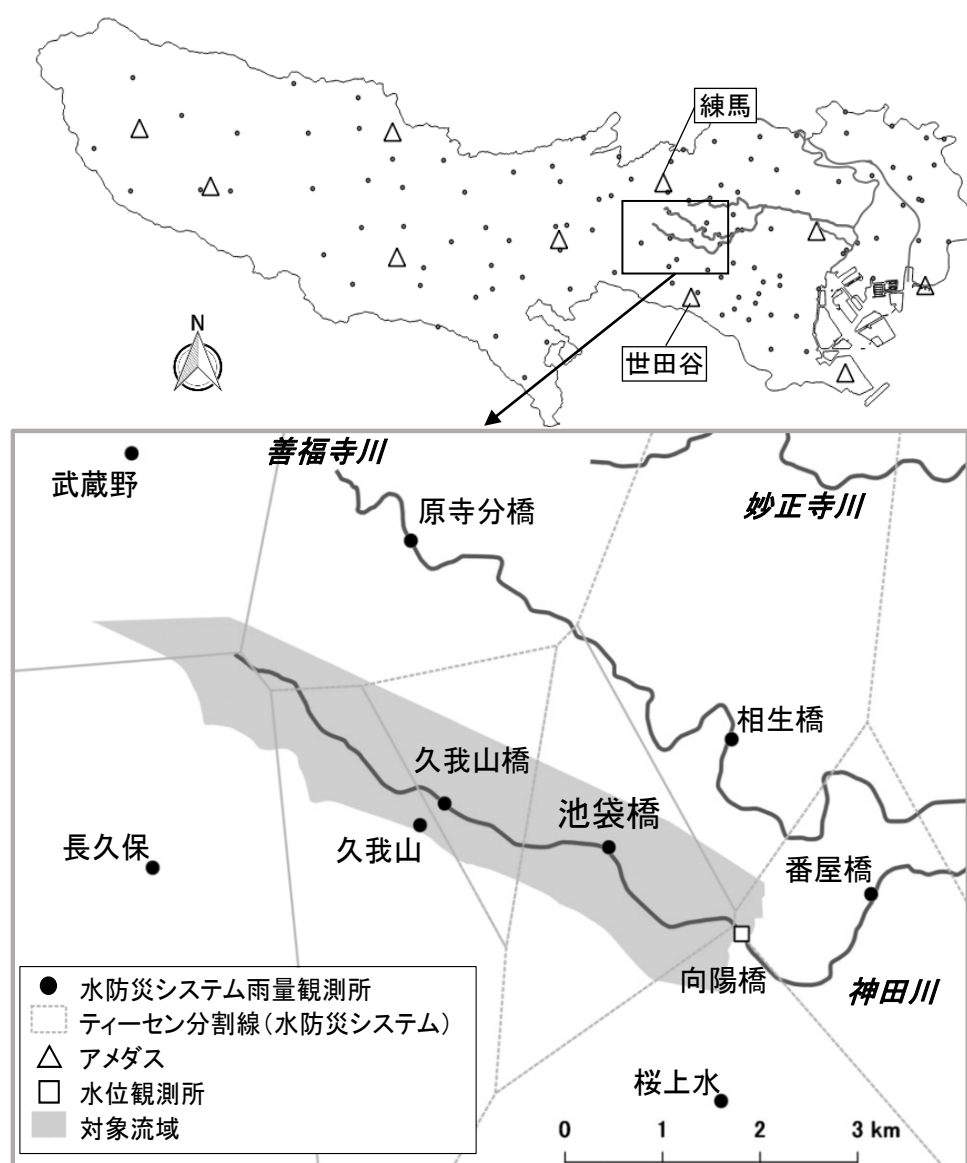


図 4-1 対象流域および地上雨量観測所

対象豪雨は、第3章と同様に2013年に対象流域において発生した5豪雨とする。降雨期間は、次節に整理する地上雨量による流域平均雨量をもとに、1時間より長い無降雨状態を伴わない一連の降雨期間を抽出し、降雨開始30分前から降雨終了210分後までを流出解析に使用する降雨データ期間として設定した。表4-1には、対象豪雨イベント、池袋橋雨量観測所における最大30分累加雨量、流出解析に使用する降雨データ期間および降雨要因を一覧で示した。

表 4-1 対象豪雨イベント一覧表

豪雨 イベント	30分累加雨量 (池袋橋)(mm)	流出解析に使用する 降雨データ期間	降雨要因
No. 1	36	9/15 03:20-9/15 17:20(841分)	台風18号
No. 2	35	8/12 17:14-8/12 23:39(386分)	大気状態不安定
No. 3	31	6/25 11:38-6/25 18:10(393分)	大気状態不安定
No. 4	26	9/04 22:51-9/05 14:27(937分)	低気圧
No. 5	25	4/06 14:48-4/07 04:53(846分)	低気圧

4-3 対象豪雨イベントの豪雨特性

4-3-1 使用する降雨データ種類

使用する降雨データは、水防災システムによる地上雨量(以下、水防災システムという)、X バンド MP レーダ (以下、XRAIN という)、補正 XRAIN (詳細は次節に述べる) およびアメダスの 4 種類とし、各降雨データをもとに流出計算に用いる流域平均雨量を作成する。なお、本章では、XRAIN を構成する X バンド MP レーダ雨量のことを XRAIN と称する。

水防災システムは、**図4-1**に示す対象流域周辺において高密度に配置された水防災システム地上雨量データ (観測最小単位1mm, 1分値間隔データ) をもとにティーセン法により流域平均雨量を算出した。XRAINは、**図4-2**に示す対象としたXRAINの流域メッシュエリアにおける流域平均雨量を算出した。補正XRAINは次節に述べるとおり地上雨量による時空間補正を実施した雨量である。アメダスは、対象流域内に雨量観測所が存在しないため、対象流域周辺に位置する2箇所の観測所(世田谷、練馬)の雨量データからティーセン法により流域平均雨量を求めた。これらの降雨データの諸元を**表4-2**に示す。

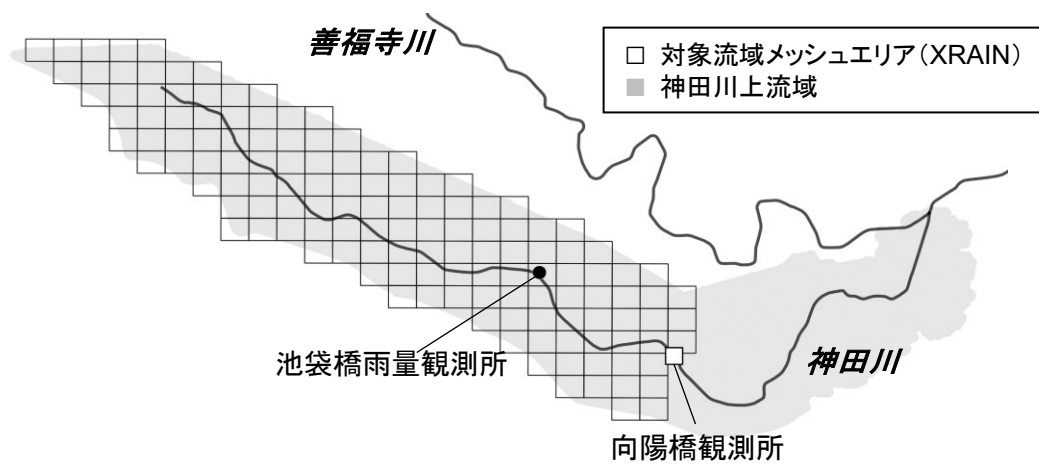


図 4-2 対象流域メッシュエリア

表 4-2 使用する降雨データの諸元一覧

	水防災システム	XRAIN	補正 XRAIN	アメダス
観測機	地上雨量計	X バンド MP レーダ		地上雨量計
時間分解能	1 分間隔	1 分間隔		10 分間隔
空間分解能	観測所 9 地点(流域内 3 地点)	約 250m×250m メッシュ (流域内 138 メッシュ)		観測所 2 地点 (流域内 0 地点)
その他	—	—	地上雨量による時空間補正あり	—

4-3-2 時空間的な相関特性を考慮した補正 XRAIN

第3章において、XバンドMPレーダ雨量と地上雨量データとの比較を実施し、必ずしも地上雨量観測地点の直上メッシュではなく、観測時差を考慮した上でメッシュ位置を空間的に補正した方が地上雨量との相関が高くなることを確認した。そのため、XRAINを時空間的に補正した場合における雨量（以下、「補正XRAIN」という）について、以下のように作成した。

補正XRAINは、XRAINと地上雨量データの相関性が最も高くなるように、①XRAIN降雨エリア全体を移動するとともに、②遅れ時間を加えた時点のXRAINデータにより作成する。

表4-3は、各豪雨イベントにおけるXRAINと水防災システムと比較して最も相関が高くなるXRAINの時間および時空間補正量を示したものである。なお、時空間補正量は、池袋橋雨量観測所の直上メッシュを(0, 0)として、その周辺メッシュ(-5, -5)～(5, 5)の11×11メッシュ=121メッシュ範囲において、空間的に座標位置を移動させて算定した相関係数が最大となる遅れ時間およびメッシュ位置である。時空間補正量の詳細については、第3章の表3-2を参照されたい。

表 4-3 XRAIN 時空間補正量

豪雨イベント No.	遅れ時間(分) ^{*1}	メッシュ移動量 ^{*2}
1	-3	(2,-2)
2	-1	(5,-1)
3	-3	(3, 4)
4	-1	(2, 3)
5	-2	(5, 1)

*1 現時点からの補正時間。現時点よりも前を「－」とする。

*2 池袋橋雨量観測所直上メッシュを(0, 0)とし、東・北方向を「＋」とする。

4-3-3 4種類の雨量データによる雨量精度評価

使用するデータの特性を把握するため、水防災システム、XRAIN、補正XRAINおよびアメダスの4種類の雨量データについて、高密度な地上雨量である水防災システムを基準として雨量精度の比較を行った。

図4-3には、豪雨イベントNo.1～No.5における流域平均雨量のハイトグラフおよび累加雨量を示す。図4-3 a), e)等を見ると、いずれの降雨データの種別を見ても概ね同様の降雨波形を示している。一方で、図4-3 c)を見ると、水防災システムとXRAINおよび補正XRAINは概ね同様の降雨波形を表現できているが、アメダスでは総雨量に大きな差異がある。これは、対象流域を含む広範囲に雨域が存在している豪雨イベントNo.1やNo.5に対して、No.3は大気状態不安定に起因した局所的な豪雨であり、流域内に観測所が存在しないアメダスではその豪雨を捉えることができなかったためである。

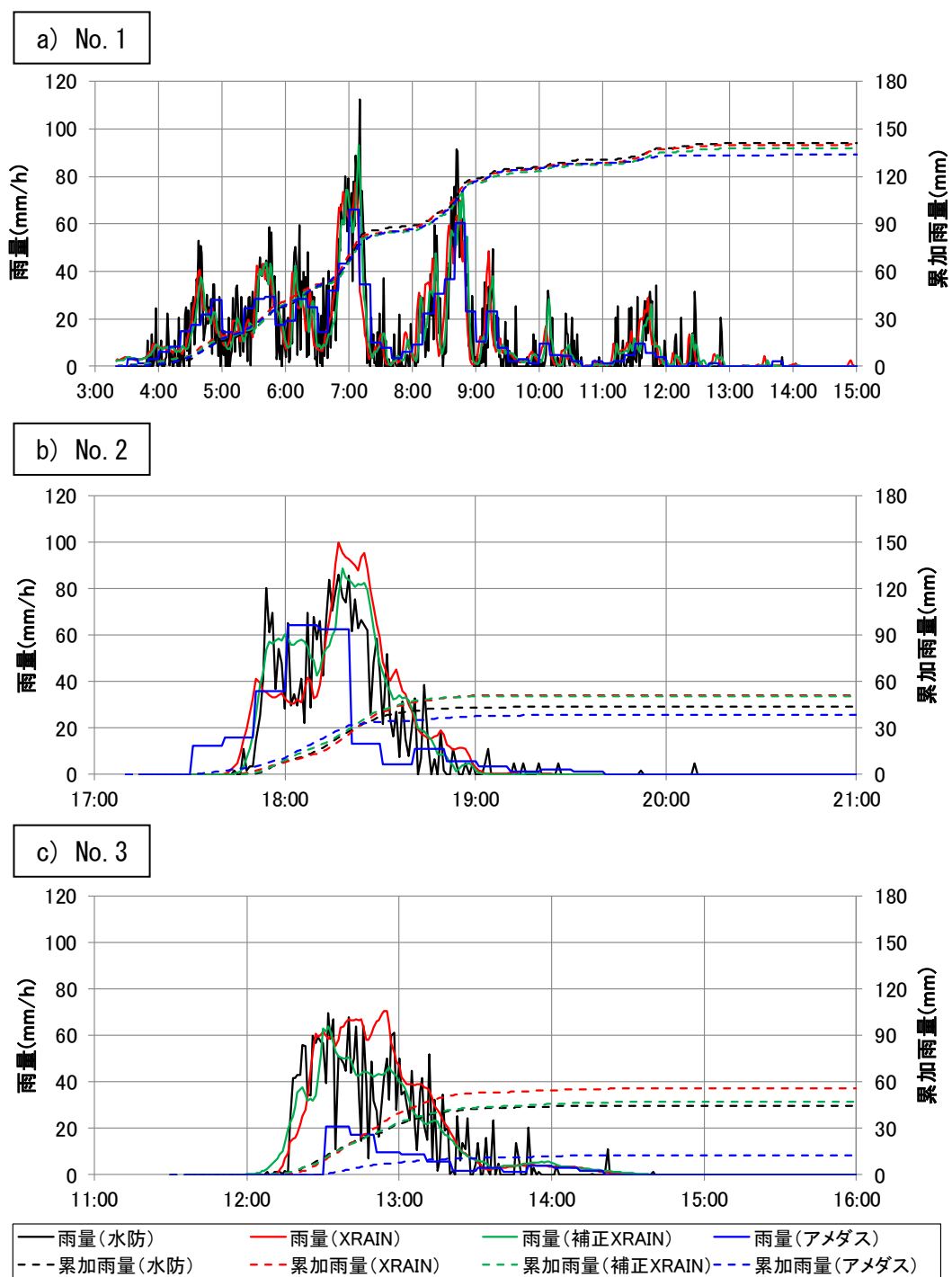


図 4-3 ハイエトグラフおよび累加雨量比較図 (1)

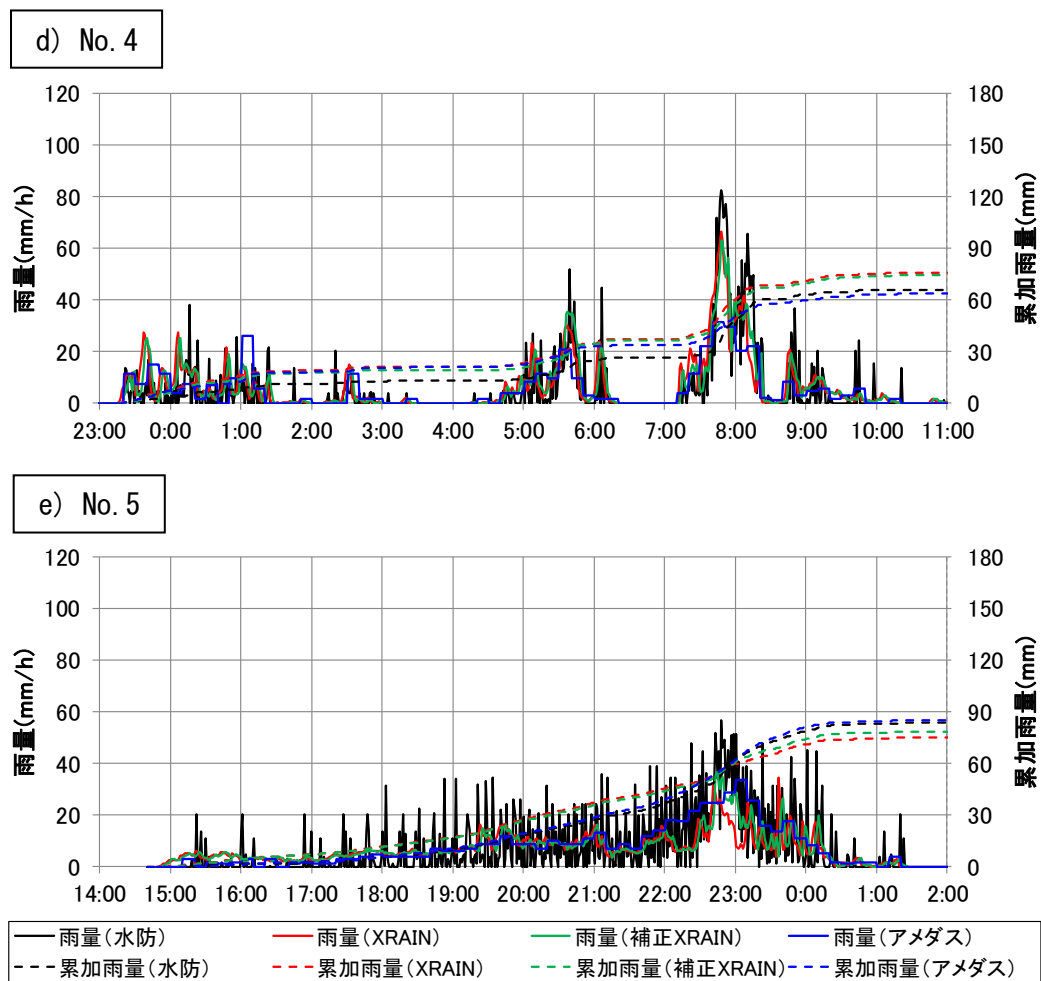


図 4-3 ハイエトグラフおよび累加雨量比較図 (2)

次に、図4-4に水防災システムに対するXRAIN、補正XRAINおよびアメダスの総雨量比と相関係数をそれぞれ示す。図4-4 a)より、総雨量比に関しては、概ねどの豪雨イベントにおいても、雨量比1.0に対して2割程度の以内となっている。平均値でみると補正XRAINにおける総雨量1.06が最も1.0に近い。なお、No.3に関してはアメダスの総雨量比が0.3程度と1.0から大きく乖離している。図4-4 b)より、相関係数に関しては、XRAIN、補正XRAINでは、平均値でそれぞれ0.80、0.86となっている。補正XRAINは全ての豪雨イベントにおいて、XRAINよりも水防災システムとのより高い相関性を確保している。アメダスでは、平均値が0.74となっており、XRAINや補正XRAINより低い値となっている。なお、No.5に関しては、補正XRAIN、アメダス、XRAINの順に相関が高くなっている。これは、No.5は対象流域の東側に強雨域を伴う豪雨であり、アメダスの世田谷観測所で強雨域をたまたまとらえることができたが、XRAINでは図4-3 e)に示すとおり豪雨ピークとなる後半の22:30くらいから30分程度において、流域内の強雨域を十分捉えることができていないためである。

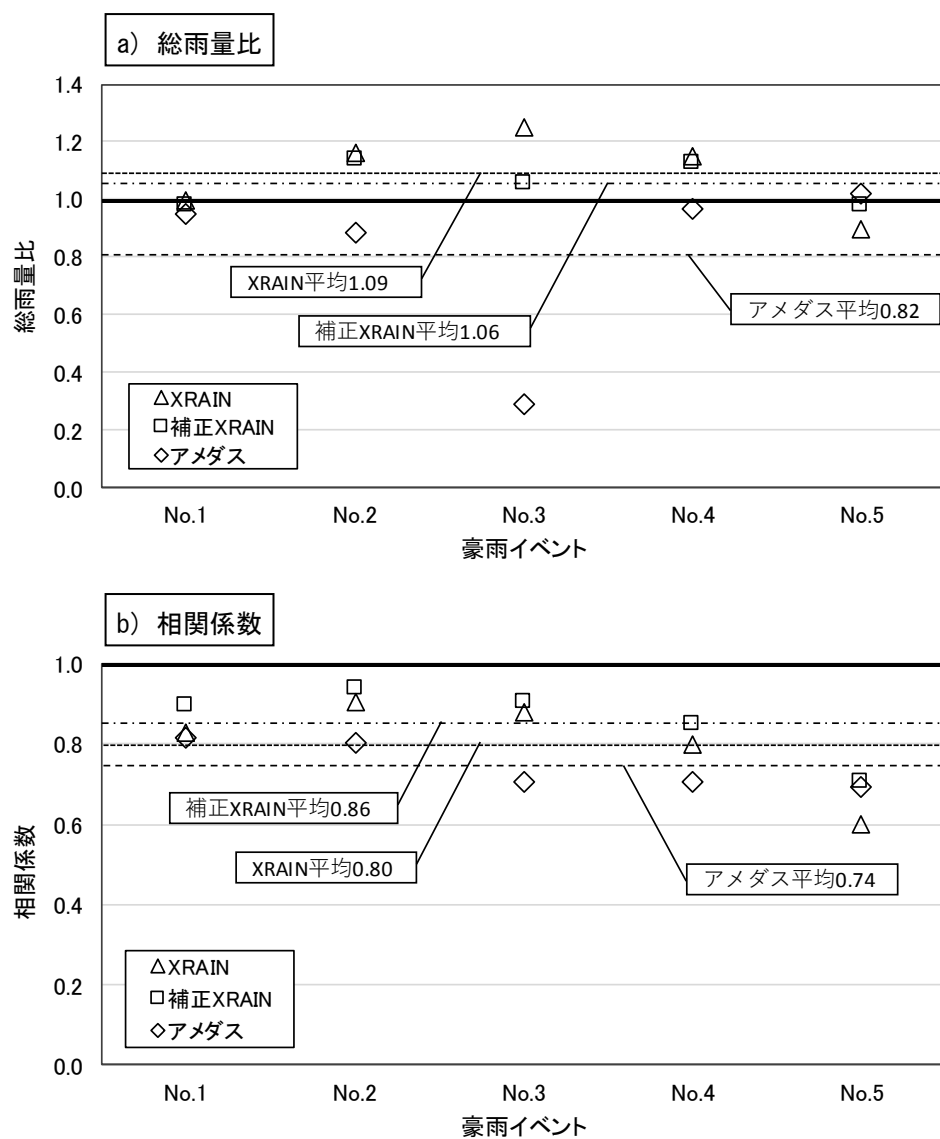


図 4-4 水防災システムとの総雨量比および相関係数

4-4-1 洪水流出モデルの概要

The diagram illustrates the water balance of a combined sewer system (CWS). It shows a cross-section of a basin with a storage zone of height s and an infiltration hole of height z . The system is influenced by evapotranspiration (E), rainfall (R), and urban specific and ground water inflows from other basins (I). Water intake from the basin (Q) is shown as an outflow. Domestic sewage (q_w) and storm drainage from the basin through the combined sewer system (q_R) are shown as inflows. Ground water related loss (q_i) is shown as an outflow. The total discharge from the combined sewer system (q_s) is shown as an outflow. River discharge (Q) is shown as an outflow.

82

式(1)～(4)で表される USF モデルは、合流式下水道による流域外への排水や水道の漏水など都市特有の流出機構を考慮し、全流出成分を概念的に組み込むことによって有効雨量の算定や流出成分の分離作業が不要といった特徴を有している。式(1)は流域からの流出量と流域の総貯留高の関係式、式(2)はその連続の式、式(3)は地下水関連損失量、式(4)は流域からの流出量と合流式下水道による流域外への雨水排水量の関係を示している。

$$s = k_1(Q + q_R)^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} \{(Q + q_R)^{p_2}\} \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = R + I - E - O - Q - q_R - q_l \quad (2)$$

$$q_l = \begin{cases} k_3(s - z) & (s \geq z) \\ 0 & (s < z) \end{cases} \quad (3)$$

$$q_R = \begin{cases} \alpha(Q + q_R - Q_o) & (\alpha(Q + q_R - Q_o) < q_{R\max}) \\ q_{R\max} & (\alpha(Q + q_R - Q_o) \geq q_{R\max}) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 s ：総貯留高(mm)、 t ：時間(min)、 Q ：河川流出量(mm/min)、 q_R ：合流式下水道による流域外への雨水排水量、 $q_{R\max}$ ：最大雨水排水量、 q_l ：地下水関連損失量(mm/min)、 R ：降水量(mm/min)、 I ：都市特有の流入量・流域外からの地下水流入(mm/min)、 E ：蒸発散量(mm/min)、 O ：取水量(mm/min)、 z ： q_l が発生する浸透孔高(mm)、 Q_o ：初期河川流出量(mm/min)、 α ：下水道排出係数、 k_1, k_2, k_3, p_1, p_2 ：モデルパラメータ。

本研究で対象とする向陽橋地点上流域における流入成分 I は、環境用水としての導水は玉川上水に送水された下水処理水および神田川の水源である井の頭池の水位維持のための補給水量を考慮し、 $I=0.0011\text{mm/min}$ とし、また合流式下水道による流域外への最大雨水排水量 $q_{R\max}$ は、流域外に接続する下水道の流下能力と計画汚水量から、 $q_{R\max}=0.033\text{mm/min}$ と設定した。

4-4-2 洪水流出モデルのパラメータ設定方法

(1) USF 法の概要

USF モデルにおいて同定すべきパラメータは、 k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 , z , α の 7 個である。設定するパラメータは、それぞれの対象豪雨を入力したときに USF モデルにおける流出ハイドログラフの再現性が最も高くなるように SCE-UA 法を用いて最適なパラメータを同定する。

SCE-UA 法は、流出解析モデルのパラメータ最適化を目的にアリゾナ大学で考案された人工知能 (AI) における進化的計算 (Evolutionary Computation) 手法の一種である。SCE-UA 法は、シンプレックス法、ランダム探索、競争進化、集団混合の概念を組み合わせたアルゴリズムを持つ大域的探索法であり、モデルパラメータの同定手法として強力かつ効率的な自動最適化手法である^{2)~4)}。既往の研究⁵⁾において、USF モデルに対する複数の最適化手法 (SCE-UA, PSO (Particle Swarm Optimization), Cuckoo Search) による比較を実施し、USF モデルに対して SCE-UA 法の適用性が高いことを示している。

SCE-UA 法による最適なパラメータ同定の主な手順は以下の通りである。全体のフローおよび CCE アルゴリズムのフローをそれぞれ図 4-6 および図 4-7 に示す。

【SCE-UA 法の主な手順】

① ポピュレーションの生成

探索パラメータをランダムに発生させ、複数のパラメータセットを作成

② 複数コンプレックスへのポピュレーション分離

ポピュレーションを各コンプレックス集団に分離

③ コンプレックスの進化

CCE アルゴリズムよりパラメータセットを進化 (入れ替え)

④ ポピュレーションの混ぜ合わせ

進化後のポピュレーションを混ぜ合わせて新たなポピュレーションを構築

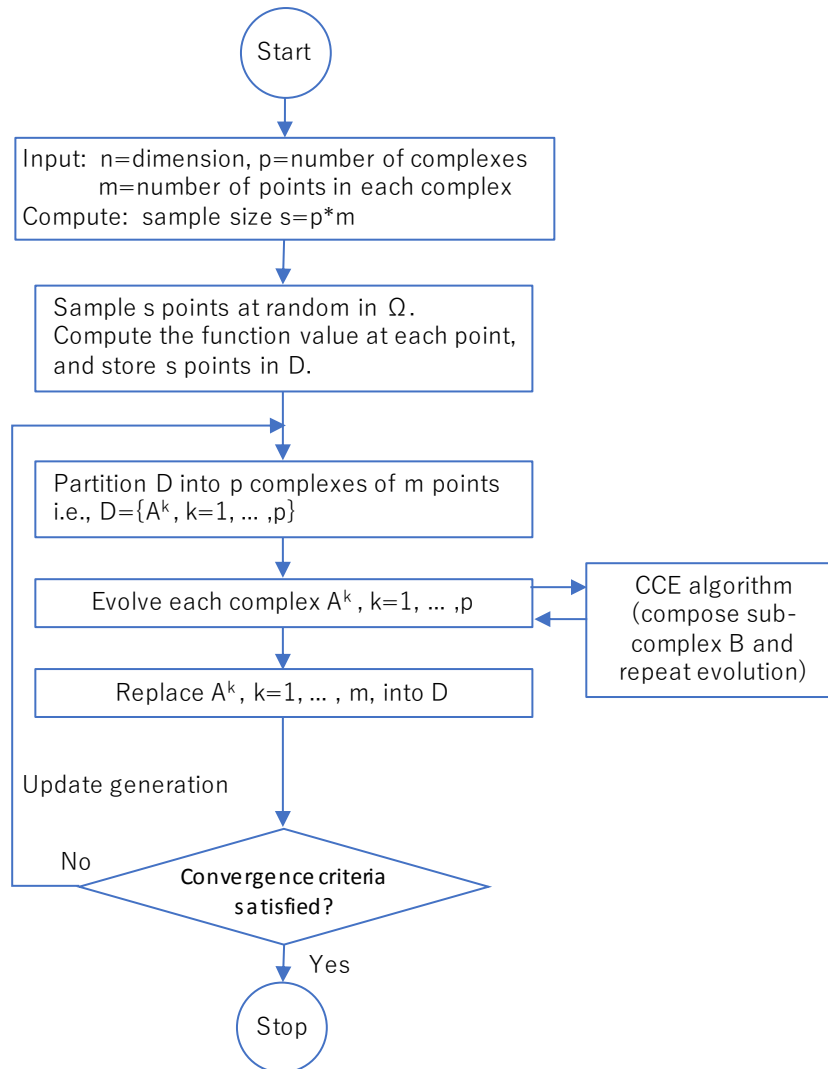


図 4-6 SCE-UA 法のフロー

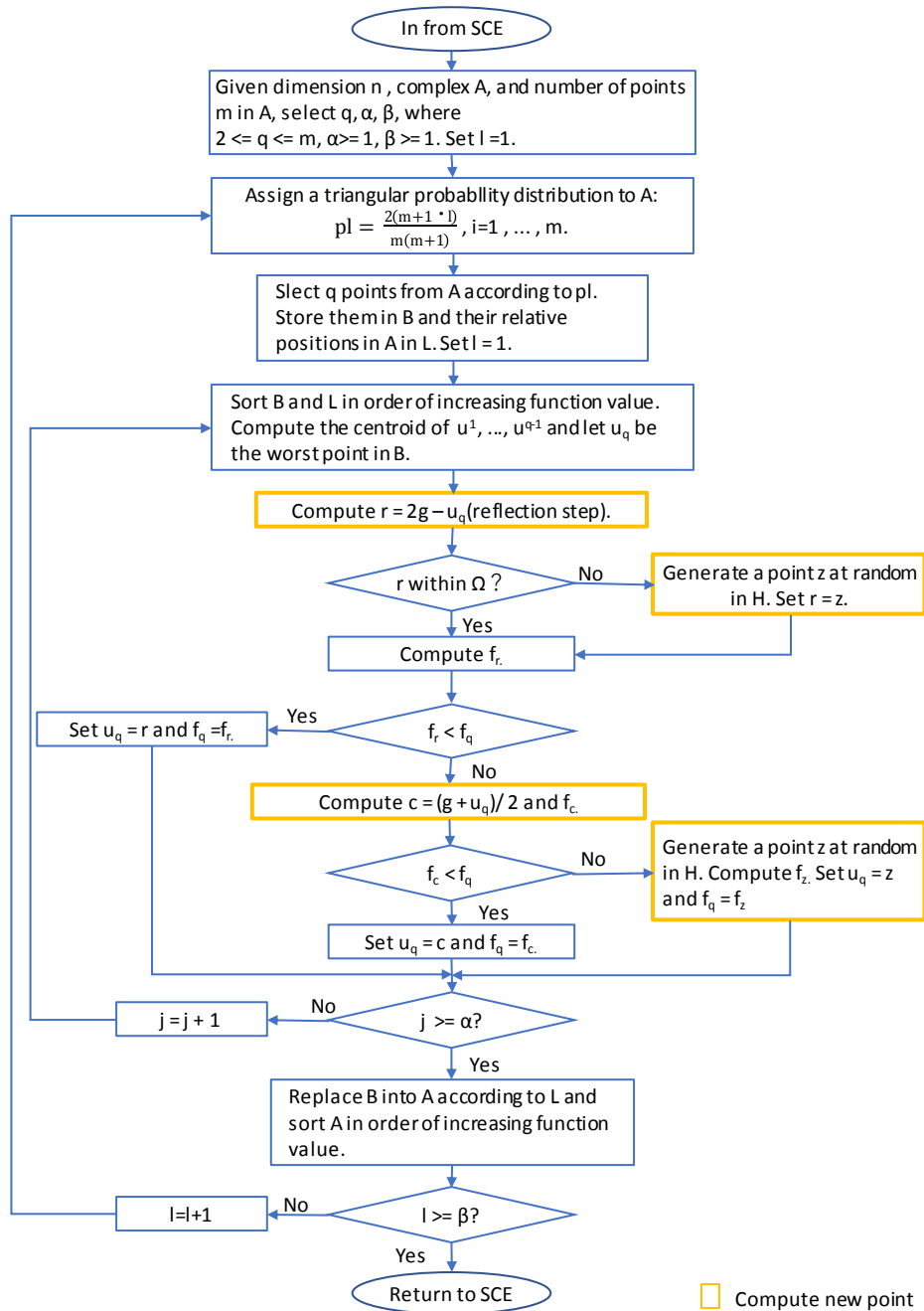


図 4-7 CCE アルゴリズム (Competitive Complex Evolution strategy) のフロー

(2) 最適パラメータの同定例

ここでは、SCE-UA 法による最適化状況について、XRAIN を用いた場合の流出ハイドログラフの再現性を示す。SCE-UA 法に用いる流出ハイドログラフの再現性の評価は、向陽橋地点の観測流量と計算流出量から算定される誤差評価関数 RMSE（平均二乗誤差の平方根）を用いている。

図 4-8 は、水防災システムを用いた場合の SCE-UA 法における第 1 世代～第 40 世代（1st Generation ～40th generation）の流出計算結果を示したものである。これより、各豪雨イベントにおいて、世代（Generation）が増加するにつれ、計算流出ハイドログラフは、観測流量の波形に近づいていることが確認できる。なお、豪雨イベント No.5 についてみると他の豪雨イベントと比較して再現性が不足しているが、その理由は後述する。

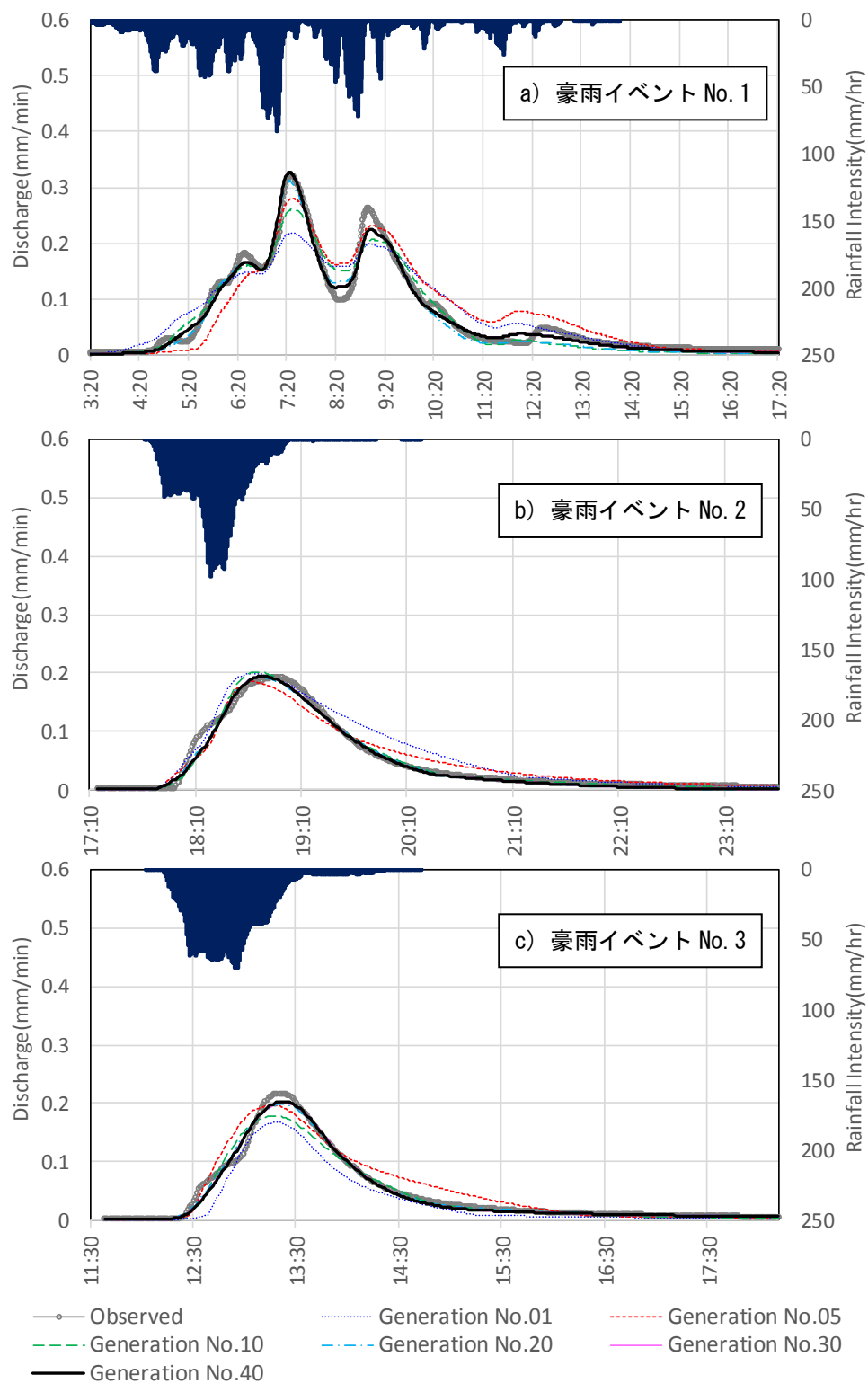


図 4-8 世代毎（Generation）の流出ハイドログラフの再現性（1）

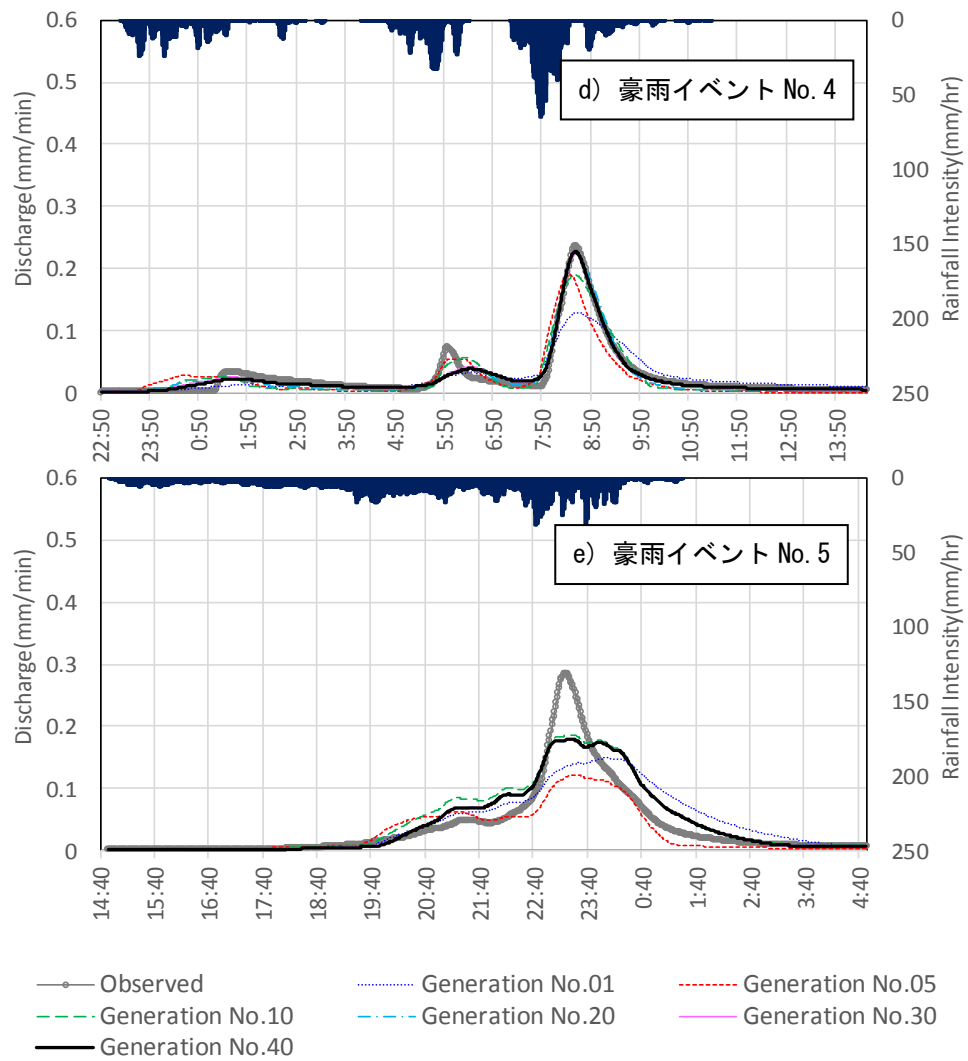


図 4-8 世代毎 (Generation) の流出ハイドログラフの再現性 (2)

また、表 4-4 には、各豪雨イベントにおける世代毎 (Generation) の RMSE 値を示した。これより、前述した流出ハイドログラフと同様に世代が増加するにつれて RMSE が低下している状況が確認される。いずれの豪雨イベントにおいても第 30～40 世代 (30th～40th generation) において、RMSE は概ね最小値に収束している。

表 4-5 には、各豪雨イベントにおける世代毎 (Generation) の PEP (Percentage error in peak discharge) の値を示した。PEP についても、RMSE と同様に、世代が増加するにつれて 0 に近づき、第 30～40 世代 (30th～40th generation) において最小値に近づいていることがわかる。

以上より、SCE-UA 法により、X バンド MP レーダ雨量と観測流量を用いて USF モデルの 7 個のパラメータを最適化した。その結果、計算流量は観測流量を精度良く再現しており、最適化した USF モデルによる流出計算結果は高い再現性を有していることがわかる。なお、先にも述べた豪雨イベント No.5 が他豪雨イベントと比較して再現性が低下している要因については、次節後半にて述べる。

表 4-4 各世代（Generation）の RMSE（mm/min）一覧表

豪雨イベント No.	世代 (Generation No.)					
	1	5	10	20	30	40
No.1	0.029	0.028	0.019	0.012	0.011	0.011
No.2	0.019	0.014	0.009	0.007	0.007	0.007
No.3	0.019	0.017	0.012	0.007	0.006	0.006
No.4	0.020	0.018	0.013	0.010	0.008	0.008
No.5	0.033	0.032	0.026	0.024	0.024	0.024
average RMSE	0.024	0.022	0.016	0.012	0.011	0.011

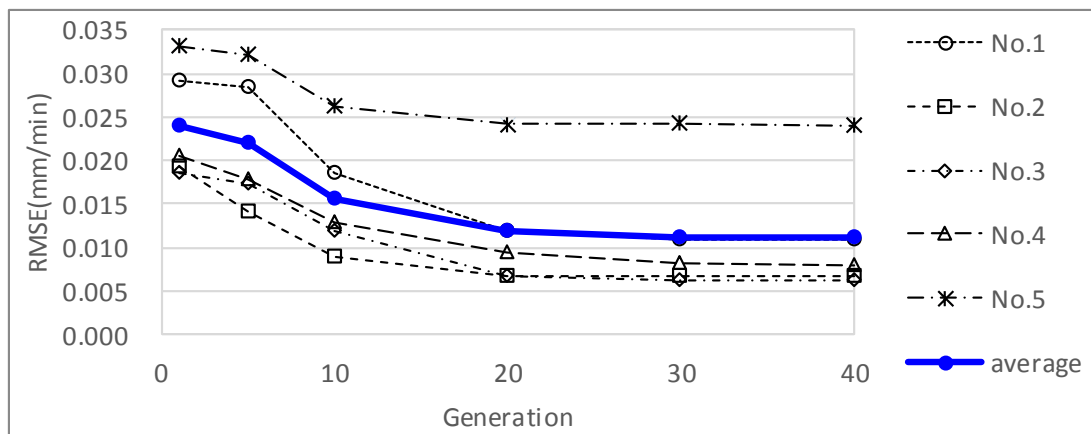


図 4-9 各世代（Generation）の RMSE グラフ

表 4-5 各世代（Generation）の PEP 一覧表

豪雨イベントNo.	世代(Generation No.)					
	1	5	10	20	30	40
No.1	-32%	-13%	-18%	-3%	2%	2%
No.2	4%	-3%	6%	0%	1%	1%
No.3	-22%	-9%	-17%	-8%	-6%	-5%
No.4	-46%	-20%	-20%	-5%	-6%	-4%
No.5	-48%	-57%	-34%	-37%	-37%	-37%
average PEP	30%	20%	19%	11%	10%	10%

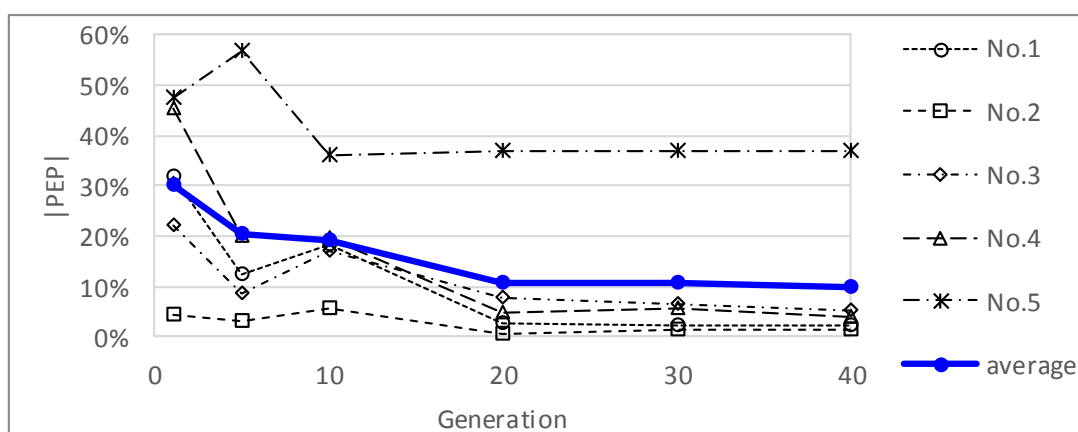


図 4-10 各世代（Generation）の PEP グラフ

4-4-3 流出ハイドログラフの再現性

SCE-UA 法により, 対象豪雨イベントごとに 4 種類の降雨(水防災システム, XRAIN, 補正 XRAIN, アメダス) それぞれに対し, 最も再現性が高くなる最適パラメータを同定した. なお, 流出ハイドログラフの再現性の評価は, 向陽橋地点の観測流量と計算流出量から算定される誤差評価関数 RMSE を用いた.

図 4-11 は, 各豪雨イベントにおける最適パラメータによる流出計算結果を示したものであり, 観測流量とともに降雨種類別の流出ハイドログラフを重ねて表示したものである. 全体的な傾向として, いずれの降雨種類においても, 計算流量は観測流量を精度良く再現しており, USF モデルによる流出計算結果は高い再現性を有していることがわかる. ただし, 図 4-11 e) に示す豪雨イベント No.5 をみると, XRAIN の計算流出ハイドログラフは, 観測流量に対して流量が上昇せずに波形が大きくつぶれていることがわかる. これは, 豪雨イベント No.5 における XRAIN は, 対象流域における降水量の精度が十分確保できていないため, USF モデルのパラメータによらず観測流量の再現が困難であることを示している. それに対して, 時空間的なメッシュ位置を補正した補正 XRAIN を用いた場合は, 計算流出ハイドログラフは観測流量と概ね同様の波形を再現できていることが確認できる.

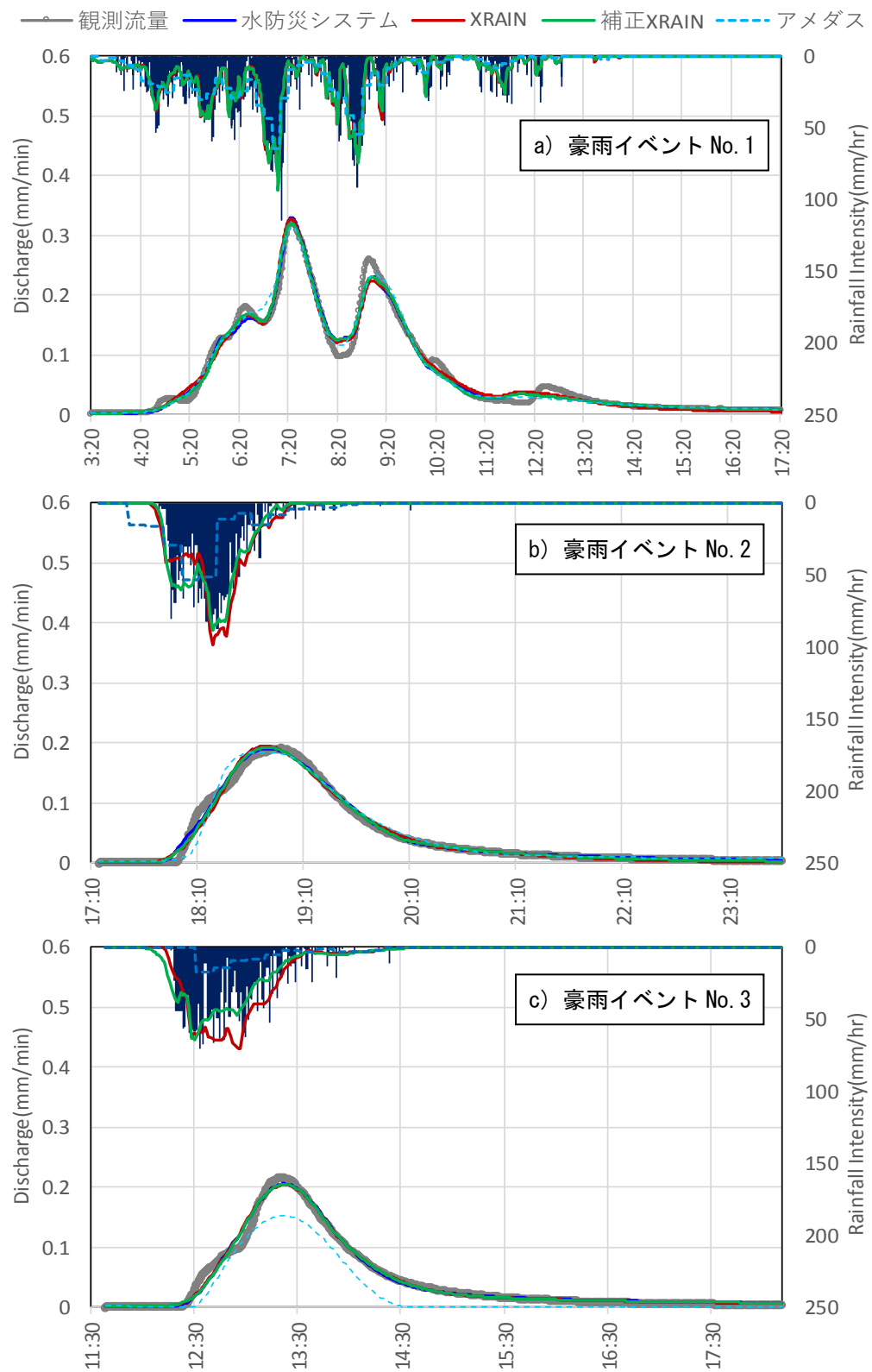


図 4-11 降雨種類別の流出ハイドログラフの再現性 (1)

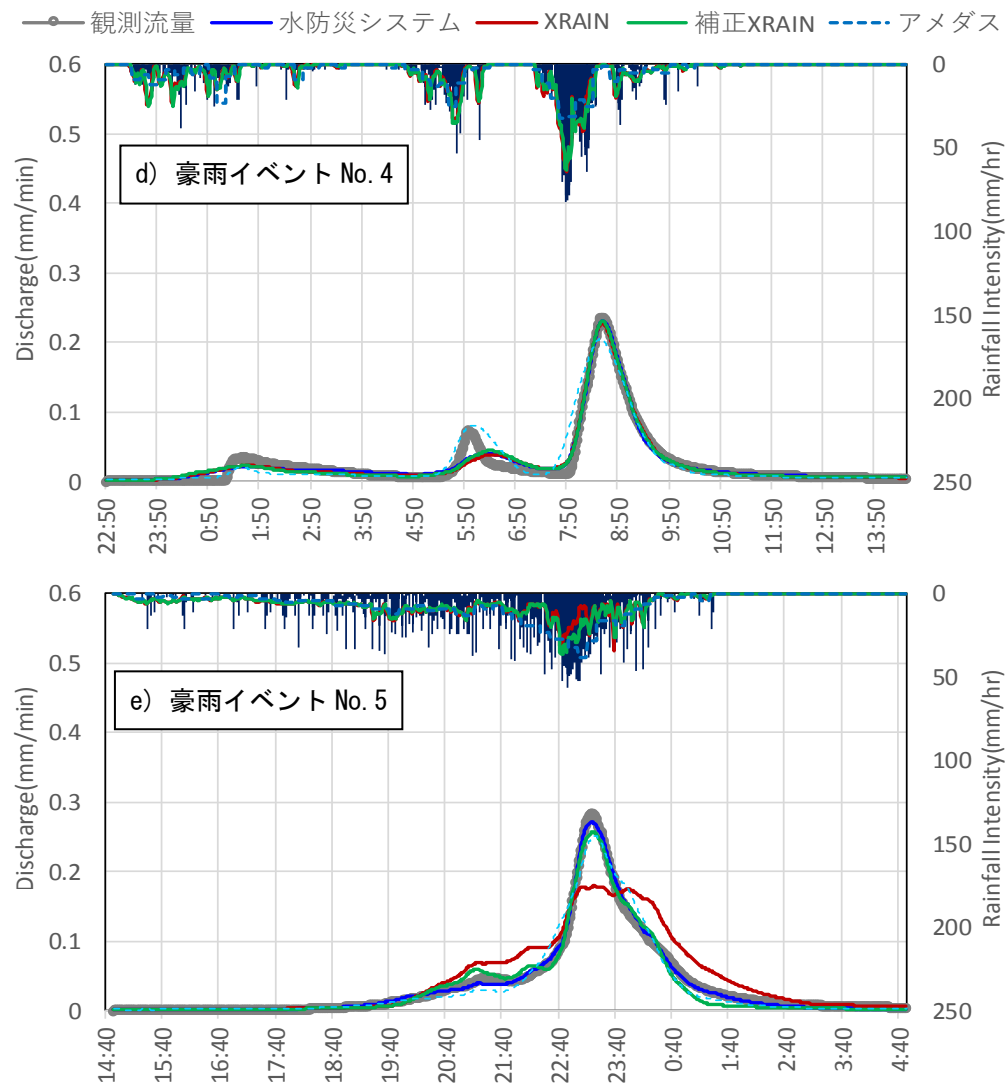


図 4-11 降雨種類別の流出ハイドログラフの再現性 (2)

図 4-12 は、流出ハイドログラフの再現性の評価に用いた誤差評価関数 RMSE について、豪雨イベントおよび降雨種類別にグラフおよび数値表を示したものである。これより、水防災システムと XRAIN による流出計算結果における RMSE を比較すると、豪雨イベント No.1～No.4 では水防災システムにおける RMSE は、XRAIN と比較して同程度か若干小さい傾向を示している。ただし、豪雨イベント No.5 では、XRAIN の RMSE は水防災システムと比べて大幅に大きくなっており、再現性が良くないことがわかる。また、補正 XRAIN による RMSE をみると、豪雨イベント No.1～No.5 では、全体として XRAIN の値よりも小さい値となっている。

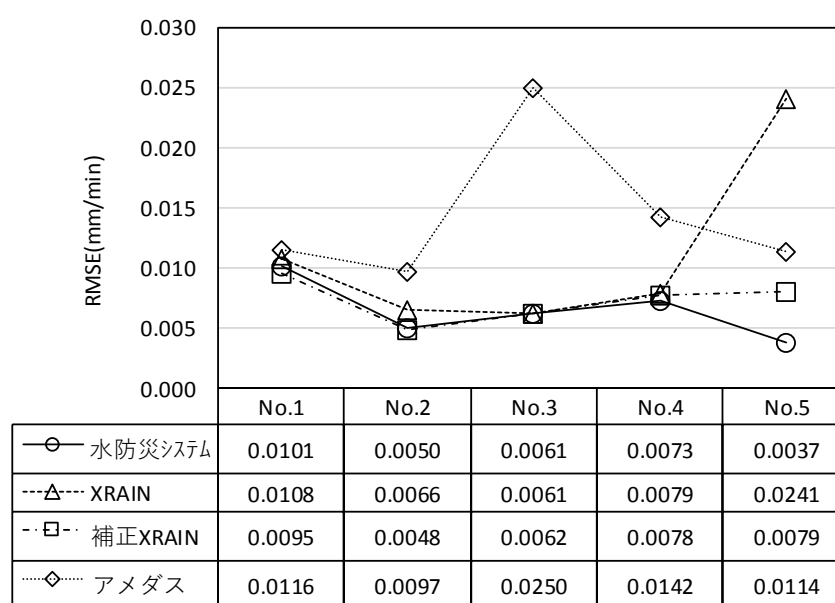


図 4-12 降雨種別毎の RMSE のグラフおよび数値表

これより、降雨として水防災システムにおける密な地上雨量を用いた場合、全体的に XRAIN よりも流出ハイドログラフは高い再現性を確保できていると判断できる。また、時空間的なメッシュ位置を補正した補正 XRAIN では、XRAIN よりも流出ハイドログラフの再現性は全体的に向上し、水防災システムとほぼ同等程度の RMSE であることが確認された。

特に豪雨イベント No.5 の場合、XRAIN では流出ハイドログラフの再現性が著しく低下しているが、補正 XRAIN を用いた場合は RMSE の値は改善することが確認された。これは次のような理由である。豪雨イベント No.5 では、対象流域の南東部に強雨域が存在しており（図 4-13）、かつ XRAIN における地上雨量との相関性の高いメッシュ位置が東側となっている。そのため、XRAIN では、実際に流域に降った降雨が捉えきれず、他の豪雨イベントに比べて流出ハイドログラフの再現性が低下している。しかし、補正 XRAIN では、時空間的な相関特性を考慮してメッシュ位置を移動することにより、実際の流域内に到達した降雨に近い雨量データとして表現でき、流出ハイドログラフの再現性も向上したものと推定される。

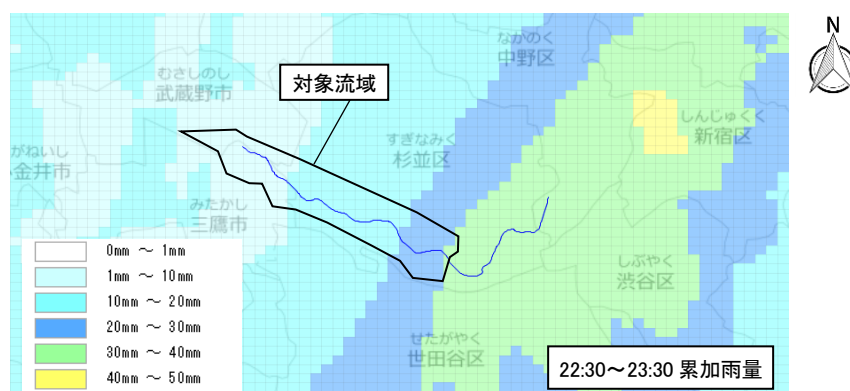


図 4-13 累加雨量メッシュ図（豪雨イベント No.5 ピーク降雨付近）

4-4-4 豪雨イベント毎のパラメータの変動特性

図 4-14 は、豪雨イベント毎に実施した各降雨種別の最適パラメータの内、式(1)における総貯留高 s と河川流出量 Q の関係を規定する 1 次項パラメータ k_I , p_I を示したものである。この k_I , p_I は、一般的な貯留関数法のモデルパラメータ K , p に相当するものであり、流出量 Q への影響が大きいパラメータである。

図 4-14 a) より、パラメータ k_I について、水防災システム, XRAIN, 補正 XRAIN に着目してみると、XRAIN の場合は、豪雨イベント No.2, No.5 で値が大きくなっており、豪雨イベント毎の k_I 値の変動幅は 40~190 である。一方、水防災システムの k_I 値の変動幅は 30~90, 補正 XRAIN では 40~130 であり、 k_I 値の変動幅は水防災システムが最も小さく、補正 XRAIN, XRAIN の順で大きくなっている。

図 4-14 b) よりパラメータ p_I についてみると、 p_I 値の変動幅は、水防災システムの場合が 0.25~0.95, XRAIN の場合は 0.10~1.35, 補正 XRAIN の場合は 0.10~1.15 であり、変動幅の傾向は前述のパラメータ k_I の場合と同様に、 p_I の変動幅は水防災システムが最も小さく、補正 XRAIN, XRAIN の順で大きくなることがわかる。

以上より、水防災システムの地上雨量観測データは、流出ハイドログラフの再現性が高いことに加えて、モデルパラメータの変動幅が小さい降雨データであることが確認された。また補正 XRAIN は水防災システムと比べると再現性が低くなるものの XRAIN と比較して、より再現性が高くパラメータ変動幅が小さい降雨データであることが示された。

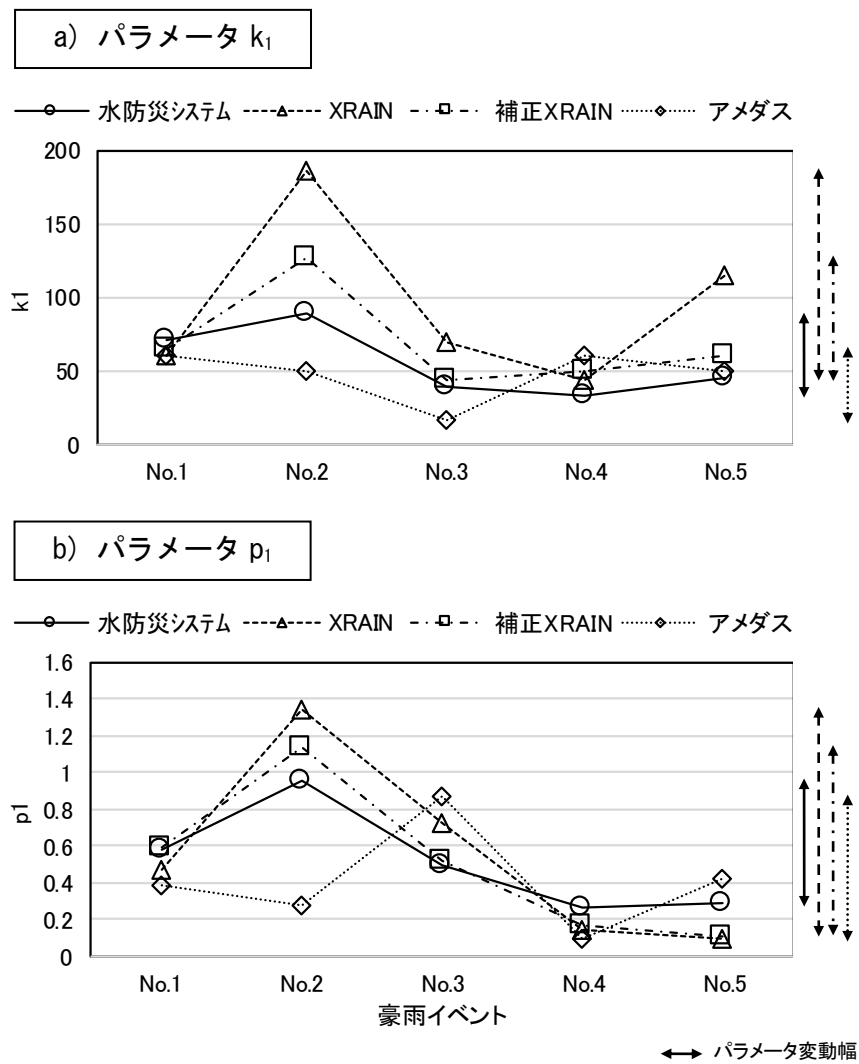


図 4-14 降雨種別毎のパラメータ (k_1 , p_1) 比較図

4-5 結語

本章では、神田川上流域における豪雨イベントを対象とし、水防災システム、XRAIN、補正 XRAIN およびアメダスの 4 種類の雨量データを対象とし、都市中小河川に適した集中型概念モデルである USF モデルを用いて流出解析を実施し、流出ハイドログラフにおける再現性を検証した。これより、水防災システムにおける高密度（観測地点間距離は東京都区部で平均約 3km）の地上雨量観測データを使用した場合、流出ハイドログラフの再現性が最も高いことがわかった。また、XRAIN は非常に詳細な空間分解能（約 $0.06\text{km}^2/1$ メッシュ）を有するものの、都市中小河川でそのまま流出計算の降雨データとして使用すると、流量ハイドログラフの再現性が低下する可能性があることを確認した。その一方で、XRAIN の時空間的な相関特性を考慮した補正を実施することで、単に XRAIN をそのまま使用するよりも、流出ハイドログラフの再現性を向上することが可能であることを示した。特に、中小河川流域における局所豪雨や流域界付近に強雨域がある場合、XRAIN の上空雨量と地上雨量の空間的な差異が大きく影響し、流出ハイドログラフの再現性が低下する恐れがある点に留意が必要であることを示した。

なお、アメダスデータを用いた場合は、流出ハイドログラフは再現精度、安定性ともに低くなる。神田川上流域における至近のアメダス観測所は、練馬もしくは世田谷であるが、ともに 5km 程度は離れている。鈴木ら⁹⁾によると時間雨量でみた場合の局地性豪雨の空間代表性が高い範囲は 2~2.5km 程度としており、局所的な豪雨を考慮すべき都市中小河川流域においては、流出ハイドログラフの再現性を確保するためにはアメダスよりも XRAIN を用いる方が優位であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博: 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.217-230, 2009.
- 2) Kawamura, A., Morinaga, Y., Jinno, K. and Dandy, G.C.: The comparison of runoff prediction accuracy among the various storage function models with loss mechanisms., Proc. of the 2nd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Vol.II, pp.43-50., 2004
- 3) 田中丸治哉: タンクモデル定数の大域的探索, 農業土木学会論文集, No.178 pp.103-112 1995.
- 4) Saritha, P.G., Akira, K., Tadakatsu, T., Hideo, A., Gubash A.: An Effective Storage Function Model for an Urban Watershed in terms of Hydrograph Reproducibility and Akaike Information Criterion. Journal of Hydrology 563, 657-668 (2018)
- 5) Kanazuka, T.: Parameter Identification of Urban Storage Function Model by Evolutionary Computing Methods. Master's Thesis, Tokyo Metropolitan University, Graduate School of Urban Environmental Sciences (2017)
- 6) 鈴木博人, 中北英一, 高橋日出男: 降雨の空間代表性ー鉄道と気象庁の降水量データをを用いた解析ー, 水工学論文集, 第52巻, pp.187-192, 2008.

第 5 章

分布型流出モデルによる豪雨流出特性

第5章 分布型流出モデルによる豪雨流出特性

5-1 緒言

第4章では、都市の流出機構を考慮した集中型概念モデルである USF (Urban Storage Function) モデルを用いて、X バンド MP レーダ雨量と水防災システムの地上雨量データによる流出解析を実施し、流出ハイドログラフの再現性を検証した。しかし、集中型概念モデルであり X バンド MP レーダ雨量を流域平均雨量として取り扱っているため、X バンド MP レーダ雨量の持つ詳細な空間分解能が流出ハイドログラフの再現性にどのような影響を及ぼすかについては明らかにされていない。

本章では、第4章と同様に神田川上流域における豪雨イベントを対象とし、X バンド MP レーダ雨量の有する空間分解能を直接入力可能な 250m メッシュ分布型流出モデルを構築するとともに、降雨データの詳細な空間分解能が流出ハイドログラフの再現性を検証し、その時空間分解能が流出ハイドログラフの再現性に与える影響について明確にする。

5-2 対象流域および対象豪雨

対象流域および対象豪雨は、第4章のUSFモデルの再現性検証に用いた対象流域、対象豪雨と同様とする。すなわち、対象流域は、図5-1に示す神田川上流域の向陽橋地点上流域、対象豪雨は表5-1に示す5豪雨とする。



図 5-1 対象流域および地上雨量観測所

表 5-1 対象豪雨イベント一覧表

豪雨 イベント	30 分累加雨量 (池袋橋)(mm)	流出解析に使用する 降雨データ期間	降雨要因
No.1	36	9/15 03:20-9/15 17:20(841 分)	台風 18 号
No.2	35	8/12 17:14-8/12 23:39(386 分)	大気状態不安定
No.3	31	6/25 11:38-6/25 18:10(393 分)	大気状態不安定
No.4	26	9/04 22:51-9/05 14:27(937 分)	低気圧
No.5	25	4/06 14:48-4/07 04:53(846 分)	低気圧

5-3 対象豪雨イベントおよび降雨データ種類

使用する降雨データは、水防災システムによる地上観測雨量(以下、水防災システムという)、XバンドMPレーダ(以下、XRAINという)およびアメダスの3種類とし、水防災システムおよびアメダス雨量については、流出計算に用いるメッシュ雨量に変換する。水防災システムは、図5-1に示す対象流域周辺において高密度に配置された水防災システム地上雨量データ(観測最小単位1mm、1分値間隔データ)をもとにティーセン法によりメッシュ雨量データを作成した。XRAINは、図5-2に示す対象流域メッシュエリアにおける雨量データを使用した。アメダスは、対象流域内に雨量観測所が存在しないため、対象流域周辺に位置する2箇所の観測所(練馬、世田谷)の雨量データからティーセン法によりメッシュ雨量データを作成した。これらの降雨データの諸元を表5-2に示す。

表 5-2 使用する降雨データの諸元一覧

	水防災システム	XRAIN	アメダス
観測機	地上雨量計	XバンドMPレーダ	地上雨量計
時間 分解能	1分間隔	1分間隔	10分間隔
空間 分解能	観測所9地点 (流域内3地点)	約250mメッシュ (流域内138メッシュ)	観測所2地点 (流域内0地点)

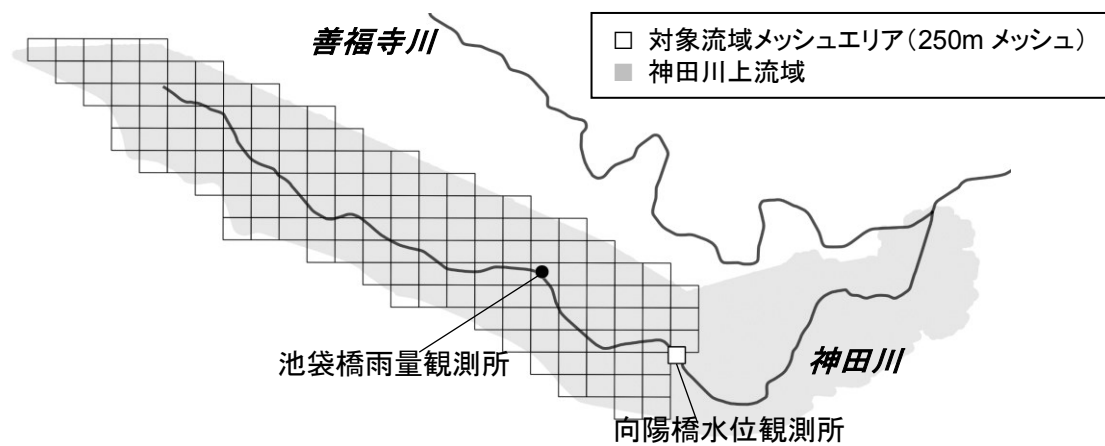


図 5-2 対象流域メッシュエリア

5-4 流出解析モデルおよびパラメータ設定手法

5-4-1 分布型流出モデルの概要および検討ケース

本研究で使用する分布型流出モデルは、土研分布型流出モデル⁹⁾における鉛直2層モデルを用いた（以下、「分布型流出モデル」という）。分布型流出モデルは、図 5-3 に示す流域内全メッシュに鉛直2層（表層、地下水層）モデルと河道モデルから構成され、河道流量は Kinematic Wave 法によって計算される。分布型流出モデル上の土地利用区分は、対象とする向陽橋地点上流域がほぼ全城市街地であることから流域内は同一パラメータを設定することとした。なお、分布型流出モデルのメッシュサイズは、XRAIN の詳細な空間分解能を直接入力するため、XRAIN のメッシュサイズ同等の約 250m メッシュサイズとし、メッシュ位置は分布型流出モデルと XRAIN で同一の位置としている。

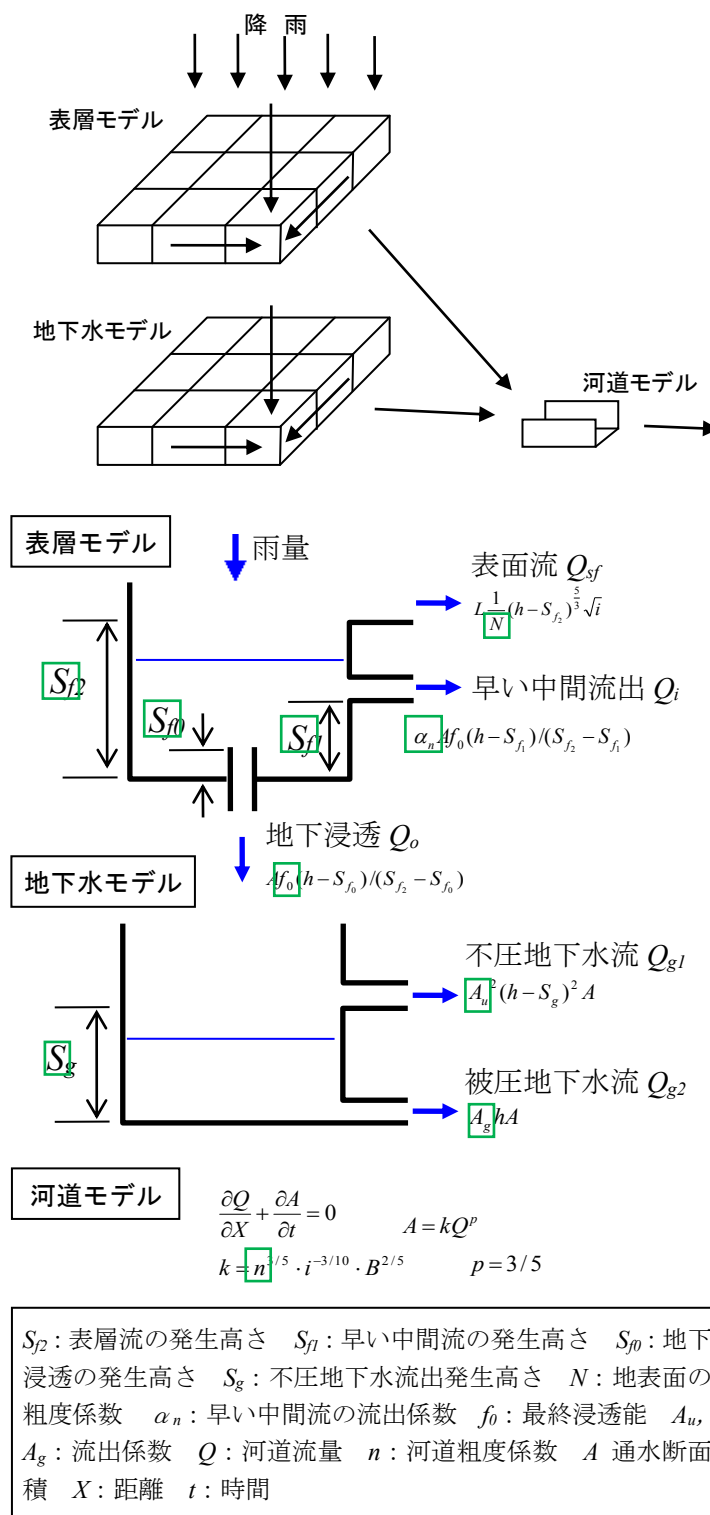


図 5-3 土研分布型流出モデルの概念図

5-4-2 検討対象豪雨ケース

検討対象とする豪雨は，前述した対象豪雨 5 イベントに対して，降雨データの種類が 3 種類（水防災システム，XRAIN，アメダス）とし，さらに降雨の空間分布の与え方の異なる 2 ケースを設定する．空間分布は，表 5-3 に示すとおり，メッシュ雨量から算定した流域平均雨量を全メッシュ様に与えたケース（Case1 流域平均雨量）と，メッシュ雨量によるケース（Case2 メッシュ雨量）を設定した．

表 5-3 降雨データの種類および降雨の空間分布の考え方

降雨の空間分布	降雨データの種類		
	水防災システム	XRAIN	アメダス
Case1 流域平均雨量	流域平均雨量（空間一様分布）		
Case2 メッシュ雨量	ティーセン法によるメッシュ雨量	メッシュ雨量	ティーセン法によるメッシュ雨量

5-4-3 分布型流出モデルのパラメータ設定方法

分布型流出モデルにおいて同定すべき対象パラメータは、図 5-3 に示す貯留高や流出係数等の 10 個とした。対象パラメータは流域一様に設定するものとし、それぞれの対象豪雨を入力したときに分布型流出モデルにおける流出ハイドログラフの再現性が最も高くなるように、第 4 章と同様に SCE-UA 法を用いて最適なパラメータを同定する。

検討対象豪雨ケースは、表 5-3 のとおり降雨データ 3 種類×空間分布 2 ケースとする。さらに、対象豪雨イベント毎に分布型流出モデルの再現性を最大限確保した場合を比較するため、表 5-1 の対象 5 豪雨イベント毎に分布型流出モデルの最適パラメータを同定した。なお、流出ハイドログラフの再現性の評価は、向陽橋地点の観測流量と計算流出量から算定される誤差評価関数 RMSE (平均二乗誤差の平方根) を用いた。

5-5 各豪雨における流出ハイドログラフの再現性

5-5-1 豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性

図 5-4 は、豪雨イベント No.1, No.3 について、Case1 の最適パラメータによる流出計算結果を示したものであり、観測流量とともに降雨データの種類別の計算流出ハイドログラフを重ねて表示した。また、図 5-5 は、同様に Case2 の最適パラメータによる流出計算結果を示したものである。図 5-4, 図 5-5 には流域平均雨量ハイトグラフも合わせて示すが、流域平均雨量のため、Case1, Case2 は同じ波形となる。

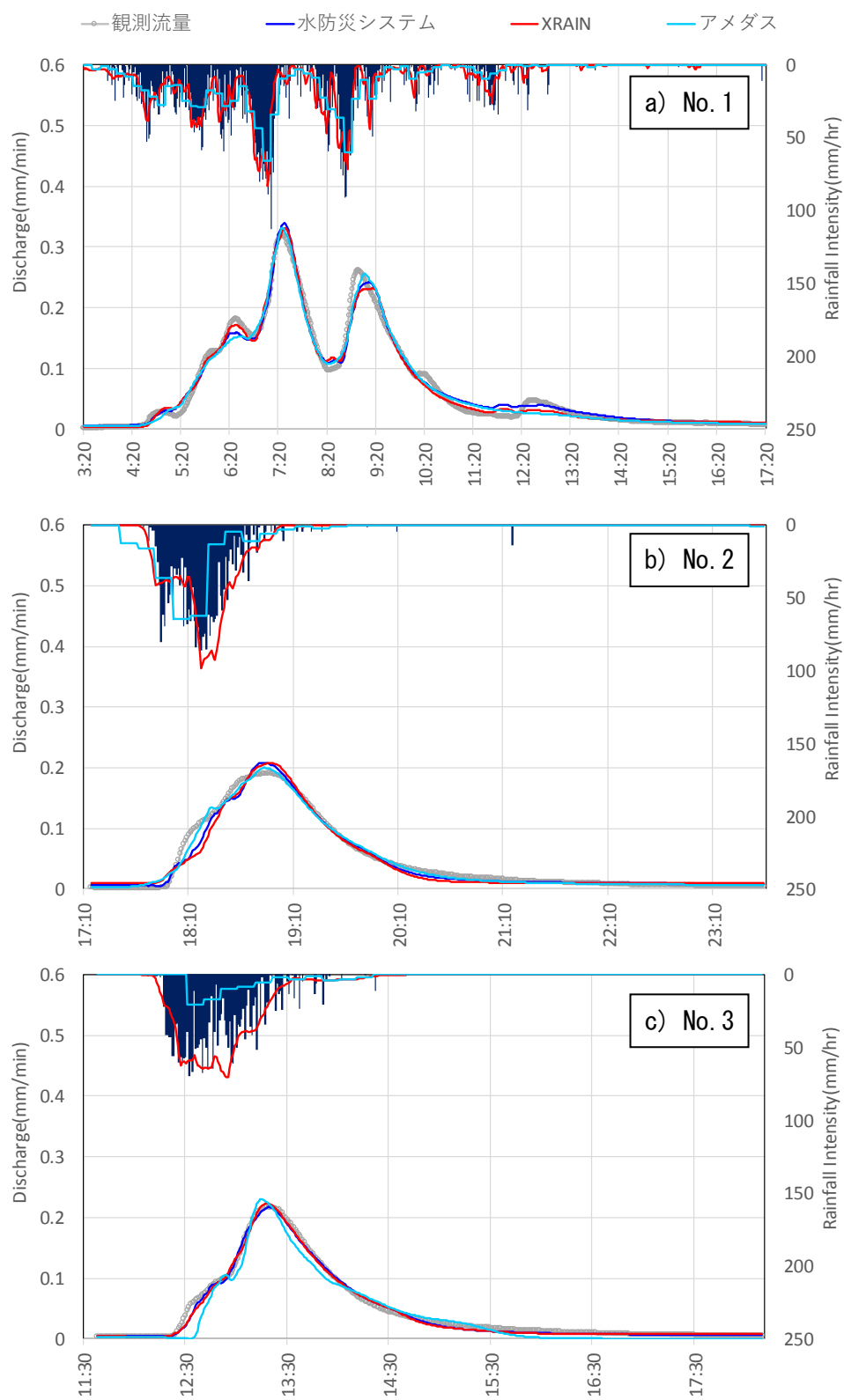


図 5-4 豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性 (Case1 流域平均雨量) (1)

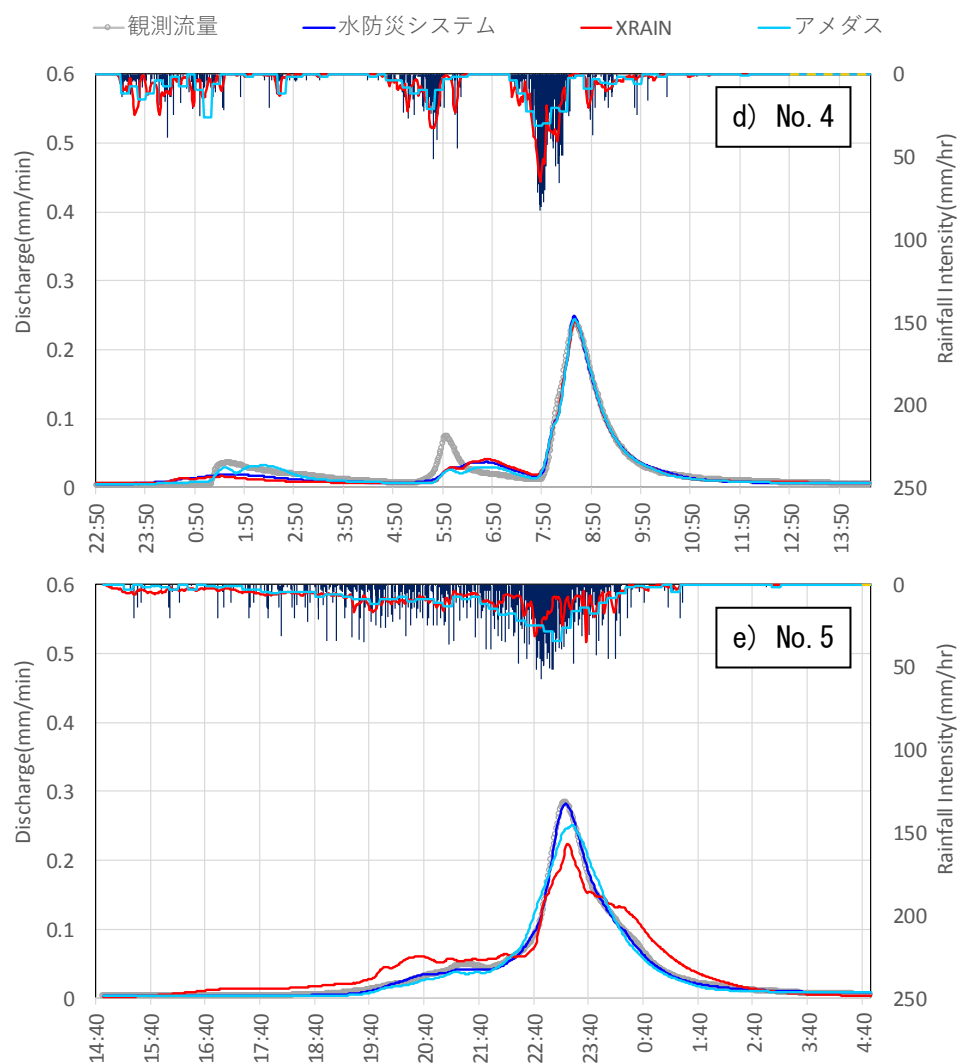


図 5-4 豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性 (Case1 流域平均雨量) (2)

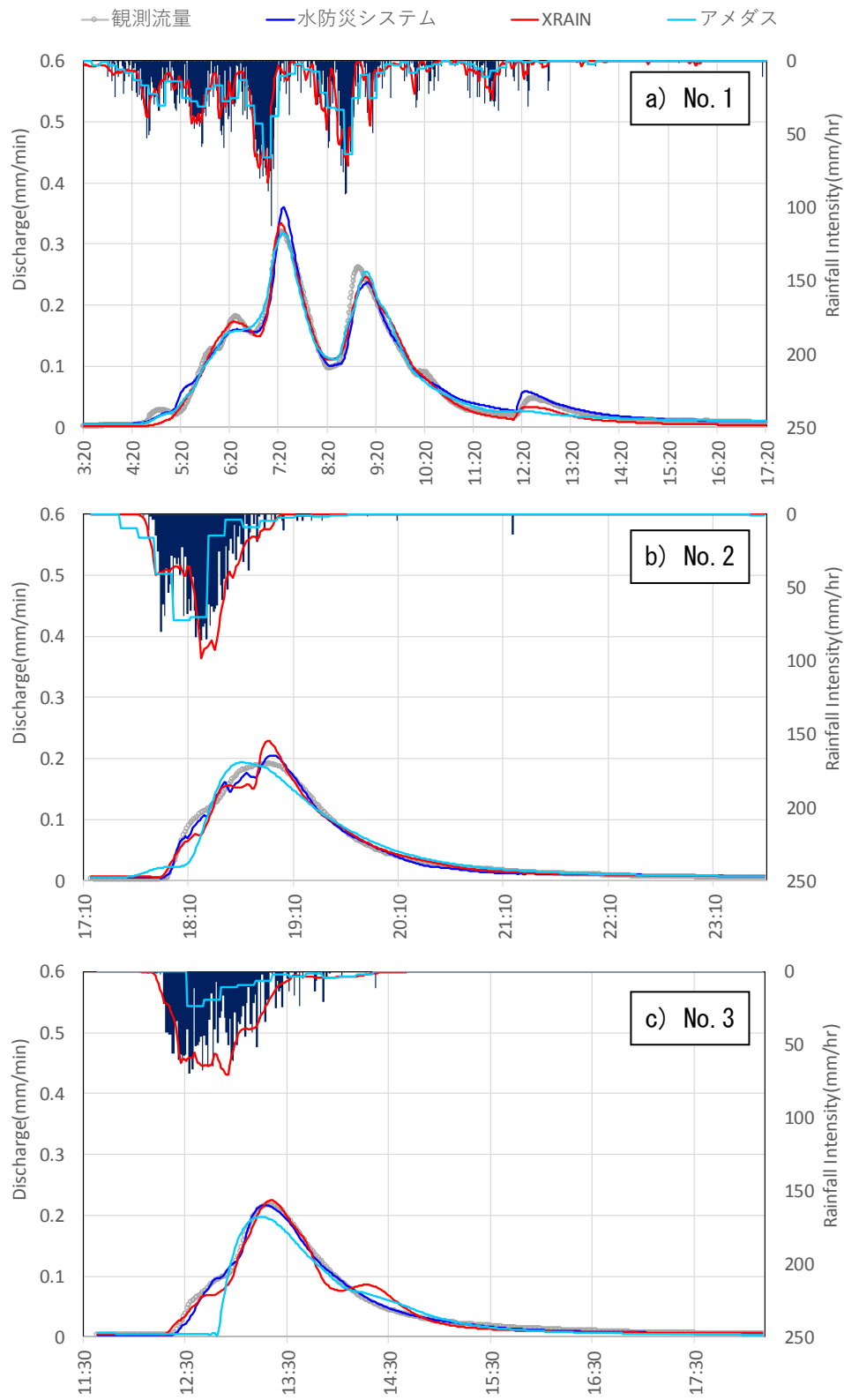


図 5-5 豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性 (Case2 メッシュ雨量) (1)

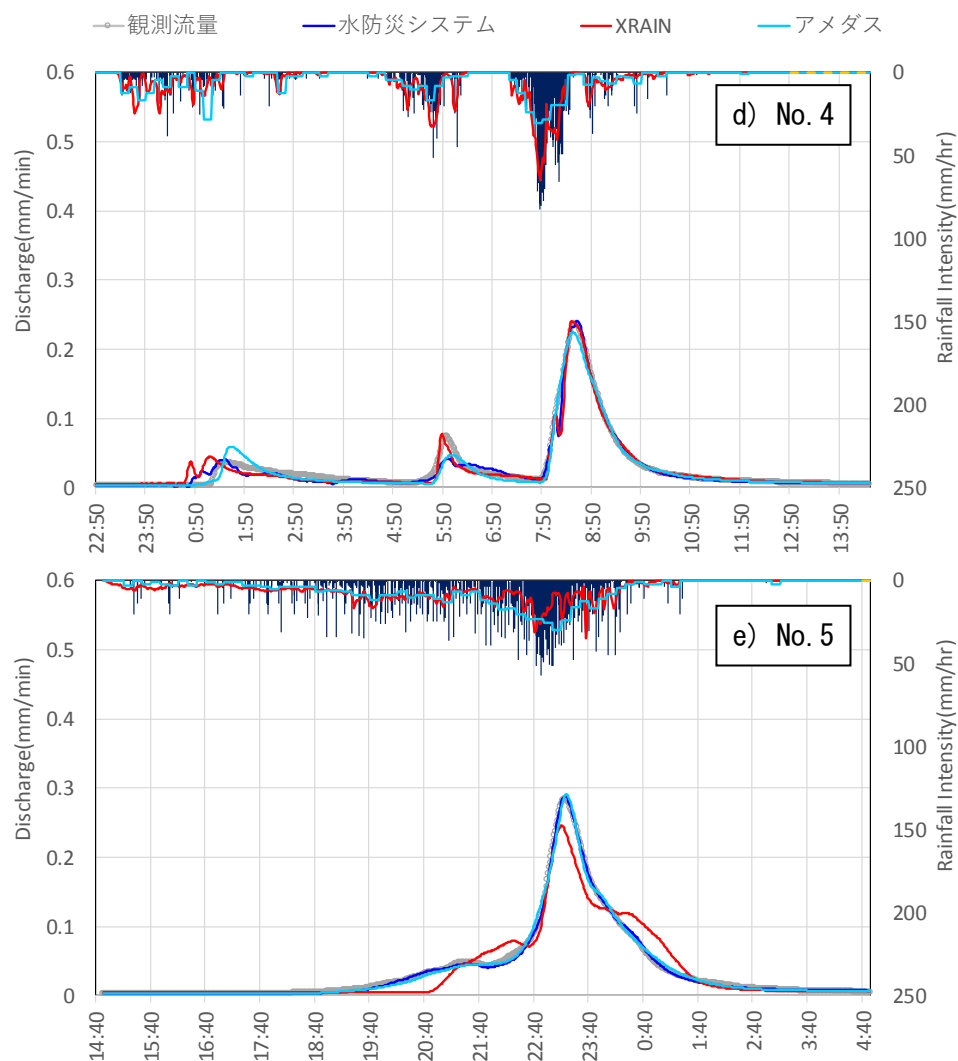


図 5-5 豪雨イベント毎の流出ハイドログラフの再現性 (Case2 メッシュ雨量) (2)

全体的な傾向として、いずれの降雨データの種類においても、計算流量は観測流量を精度良く再現しており、分布型流出モデルによる流出計算結果は高い再現性を有していることがわかる。次に流出ハイドログラフの再現性の評価に用いた誤差評価関数 RMSE (mm/min) について、降雨データの種類別に図 5-6 に示した。図 5-6 a) より、水防災システムの RMSE 平均値をみると、Case1 流域平均雨量では 0.0069, Case2 メッシュ雨量では 0.0061 である。同様に図 5-6 b), c) より XRAIN の Case1, Case2 における RMSE 平均値は、それぞれ 0.0110, 0.0106, アメダスでは、それぞれ 0.0091, 0.0106 となっている。

これより、RMSE 平均値では水防災システムが最も値が小さく、続いてアメダス、XRAIN の順で大きくなっている。XRAIN の RMSE 平均値がアメダスよりも大きくなった理由としては、特に豪雨イベント No.5 の再現精度が悪いためである。前述したとおり XRAIN では No.5 の降雨ピーク付近の降雨を十分に捉えられておらず、流出ハイドログラフの再現性が極端に低下したと推測される。また、アメダスの豪雨イベント No.3 は、図 4-4 に示したとおり総雨量比が約 0.3 と小さいため、過度なパラメータの最適化によりピーク流出量を再現している可能性がある。

次に、Case1 流域平均雨量と Case2 メッシュ雨量の違いについて比較を行った。図 5-6 a), b) より水防災システムおよび XRAIN における RMSE 平均値をみると、両者ともに Case1 に比べて Case2 の方が若干小さい値となっている。これより、メッシュ雨量を用いた場合の方が、流域平均雨量を用いた場合よりも流出ハイドログラフの再現性が全体的に向上することを示している。なお、アメダスにおける RMSE 平均値は Case2 の方が Case1 よりも大きくなったが、豪雨イベント毎の Case1 と Case2 の RMSE の大小関係には大きなばらつきが見られ、明確な傾向は見受けられない。

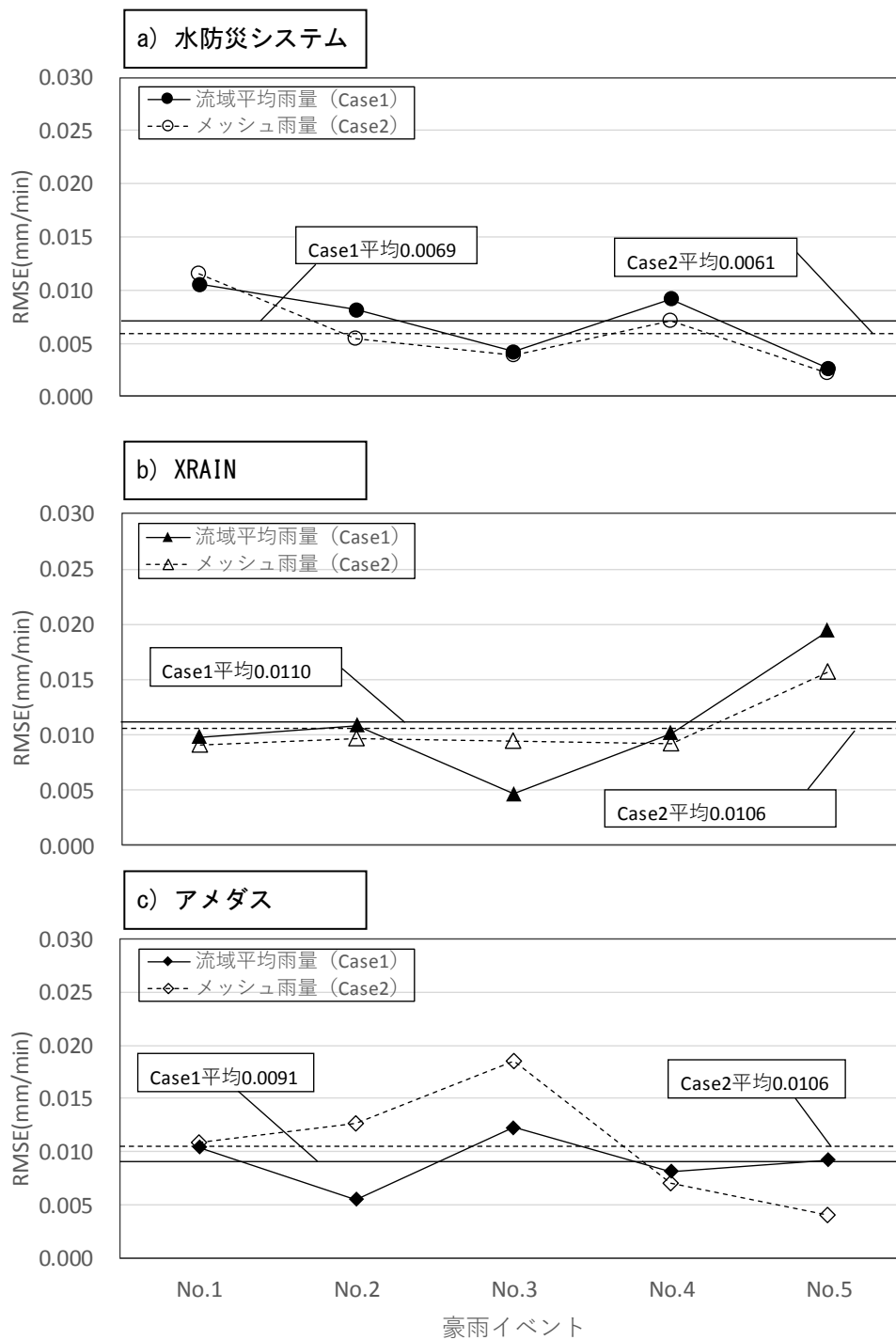


図 5-6 降雨データの種類の RMSE 図

ここで、図 5-6 b) より XRAIN の豪雨イベント No.3 では Case1 の RMSE が Case2 の RMSE と比べて大幅に小さい値となっている。これは豪雨イベント No.3 の XRAIN のピーク雨量が過大であることに加え、雨量分布をみると対象流域南側に非常に強い雨域が存在し（図 5-7）、流域内に大きな偏りの降雨となっていることに起因していると推測される。

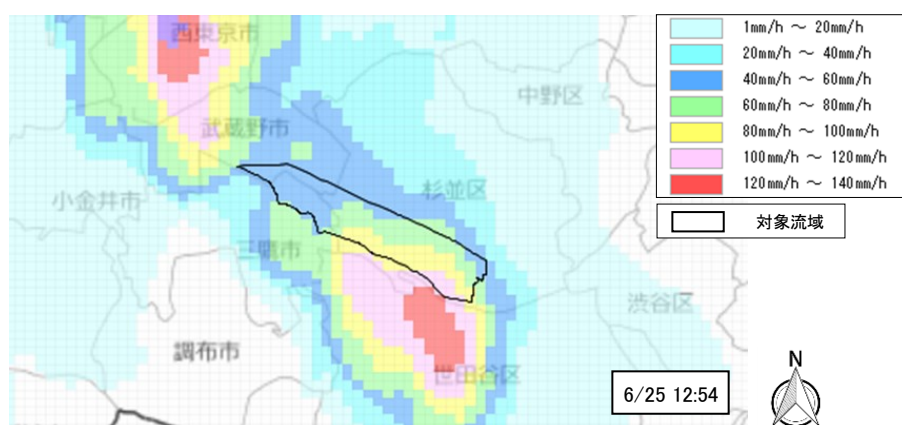


図 5-7 XRAIN メッシュ雨量分布図（豪雨イベント No.3 ピーク雨量付近）

また、Case1 流域平均雨量と Case2 メッシュ雨量を用いた場合の差異についてみるため、豪雨イベント No.4 の流出ハイドログラフ再現性を図 5-8 に示す。これより、図 5-8 a) の Case1 流出ハイドログラフでは 5:50 付近における観測流量の流量増加における再現性が低いが、図 5-8 b) の Case2 流出ハイドログラフでは、特に XRAIN において流量増加の再現性が向上していることが確認できる。

これは次の理由によるものと考えられる。図 5-8 c) に示す XRAIN のメッシュ雨量分布図（5:40 時点）をみると、向陽橋観測所付近の流域東部において強い雨域の存在が確認される。この XRAIN でとらえた詳細な空間分布を流出モデルに入力することにより、5:50 付近の短時間の流出ハイドログラフの再現性が向上したものと推定される。

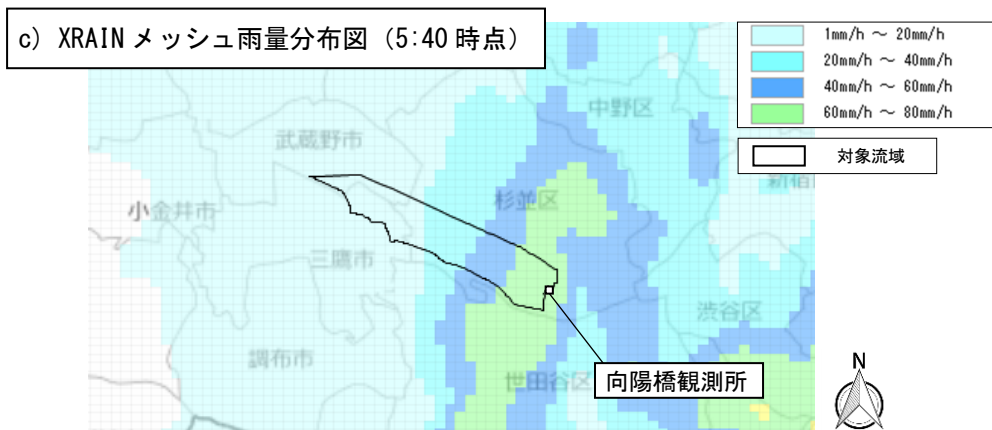
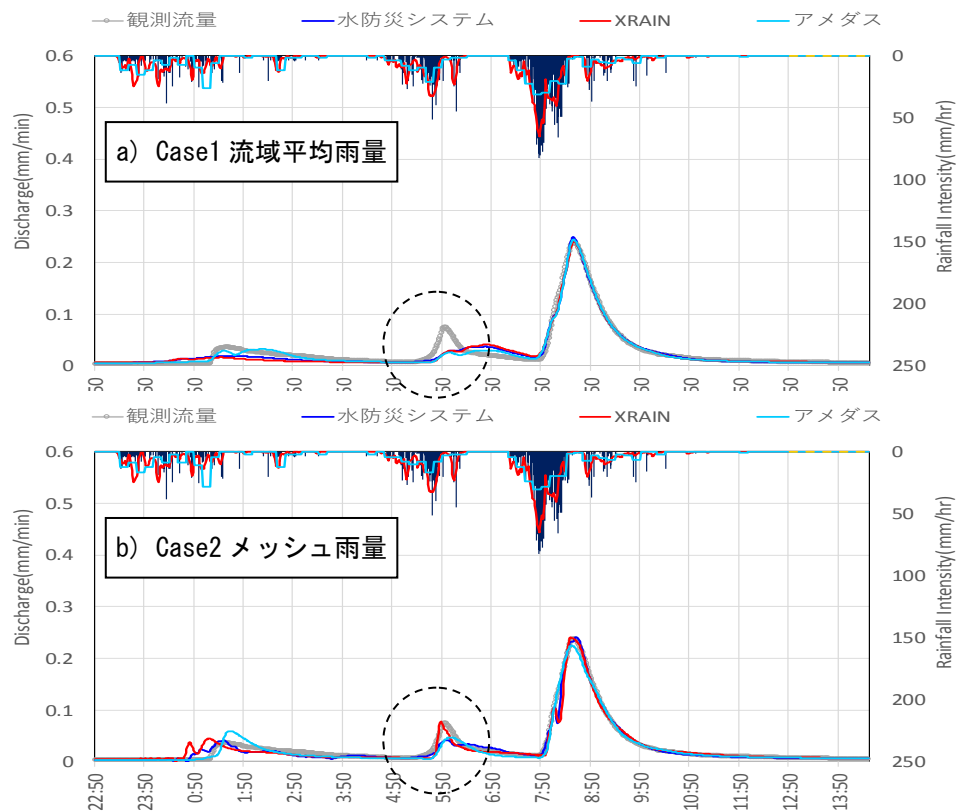


図 5-8 豪雨イベント No.4 の流出ハイドログラフ再現性の差異

5-5-2 豪雨イベント毎の最適パラメータの特性

図 5-9 には豪雨イベント毎に同定した最適パラメータのうち、早い流出に寄与する表層モデルの流出係数 (f_0 , α) について示したものである。これより、図 5-9 a) よりパラメータ f_0 についてみると、豪雨イベント No.3 ではアメダスの流域平均雨量が、他と比べて特に大きな値となっている。また、図 5-9 b) のパラメータ α についても豪雨イベント No.3 ではアメダスのメッシュ雨量が、他と比べて非常に大きい。アメダスの豪雨イベント No.3 は、前述のとおり総雨量比が約 0.3 と小さいため、最適パラメータは無理に調整されて、結果として他の豪雨イベントのパラメータと大きく値が乖離したものと推察される。また、XRAIN の No.5 についても対象流域内の降雨が過小であり、パラメータ α は大きめに設定されている。

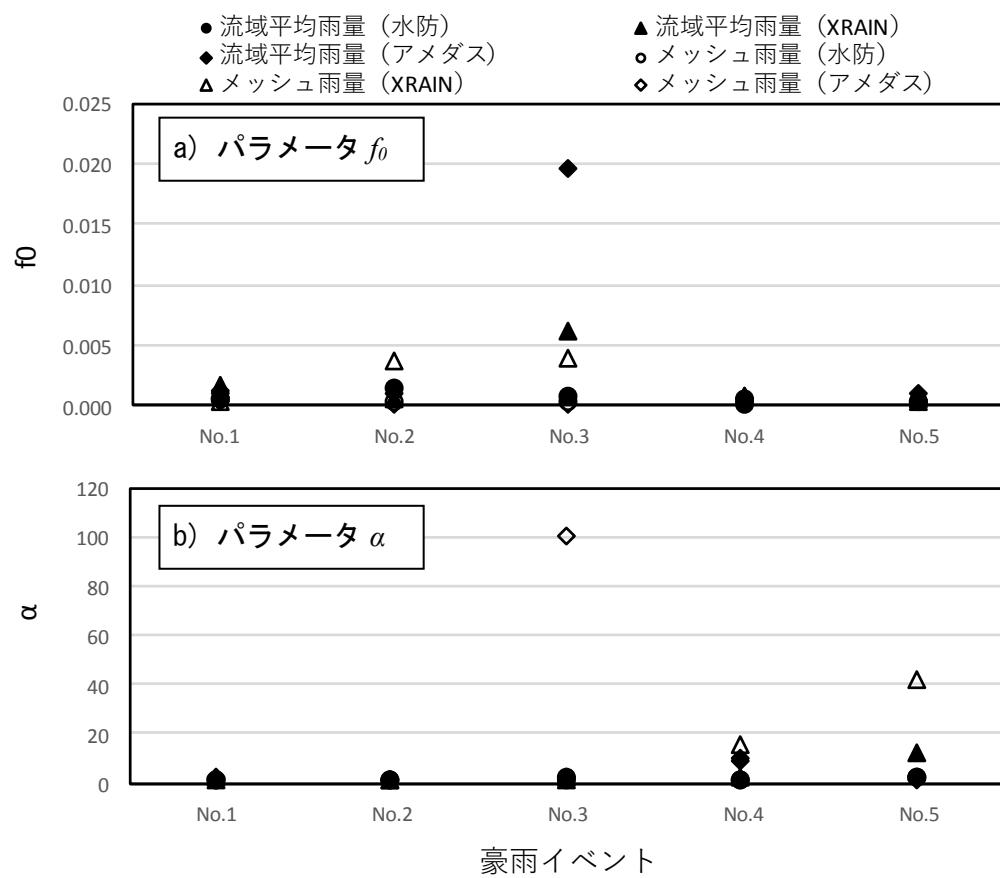


図 5-9 豪雨イベント毎の最適パラメータ

5-6 全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性

前章では豪雨イベント毎に最適パラメータを設定したが、豪雨イベント毎にパラメータが非常に大きく変動する場合があるため、ここでは、対象 5 豪雨イベント全体における最適パラメータを設定することとして、流出ハイドログラフの再現性を確認した。なお、検討対象豪雨ケースは前章と同様に、降雨データ 3 種類×空間分布 2 ケースとし、それぞれのケースに対して全豪雨イベント共通の最適パラメータを設定する。同定対象パラメータは、前節と同様に 10 個とし、誤差評価関数は豪雨イベント毎に算出した RMSE の合計値を用いた。

全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性について、各豪雨イベントそれぞれの Case1 流域平均雨量による結果を図 5-10 に、Case2 メッシュ雨量による結果を図 5-11 に示した。

全豪雨イベント共通で最適パラメータを設定しているため、前章の豪雨イベント毎に最適パラメータを設定した場合と比べて、流出ハイドログラフの再現性は低下するものの、水防災システムおよび XRAIN における計算流量は観測流量を精度良く再現していると考えられる。また、図 5-10 a) および図 5-11 a) の XRAIN の流出ハイドログラフを比較すると、Case2 の方が、再現性が高いことが確認できる。その一方で、図 5-10 c) および図 5-11 c) のアメダスの流出ハイドログラフをみると Case1, Case2 ともに再現性が著しく低いことがわかる。

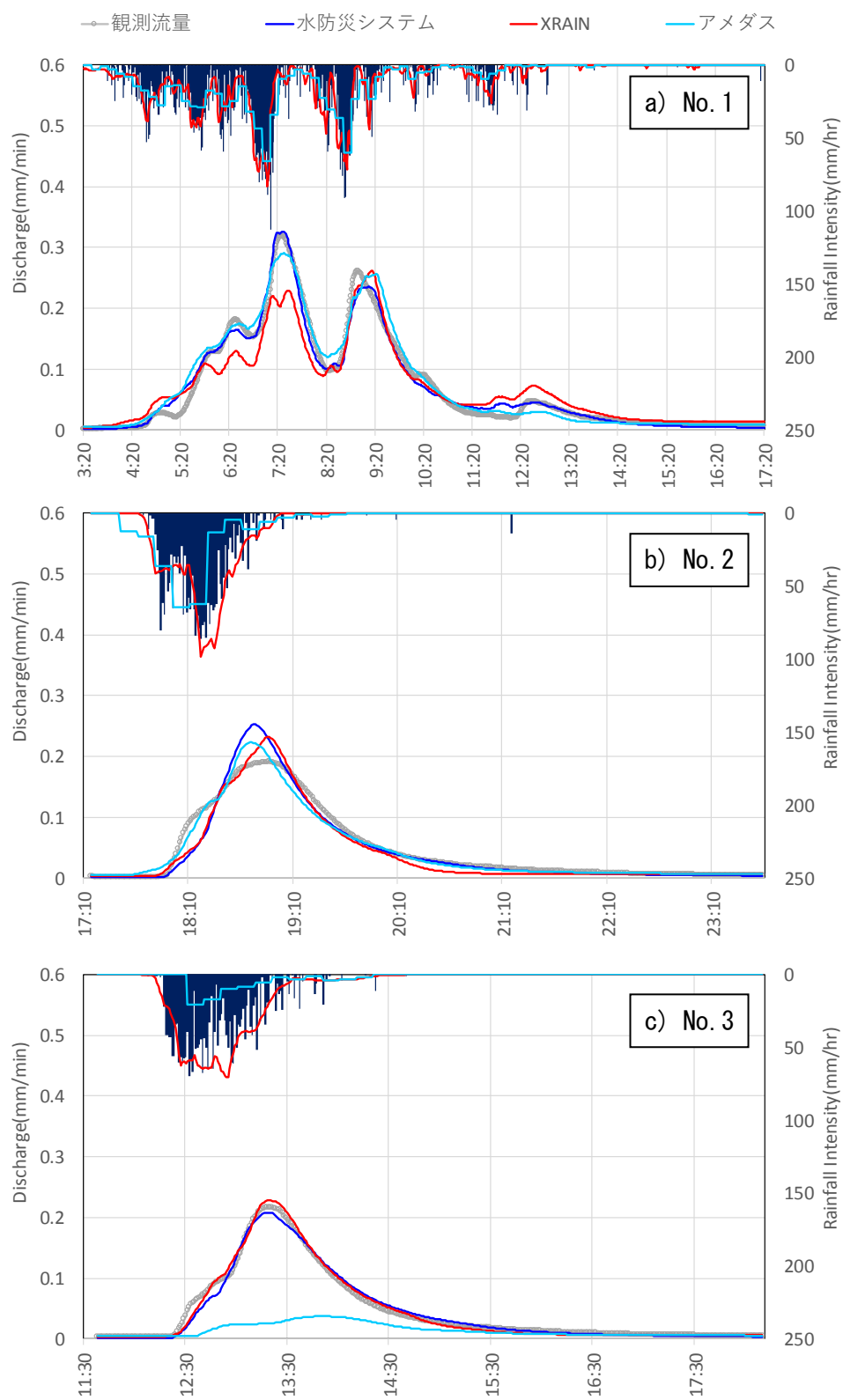


図 5-10 全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性
(Case1 流域平均雨量) (1)

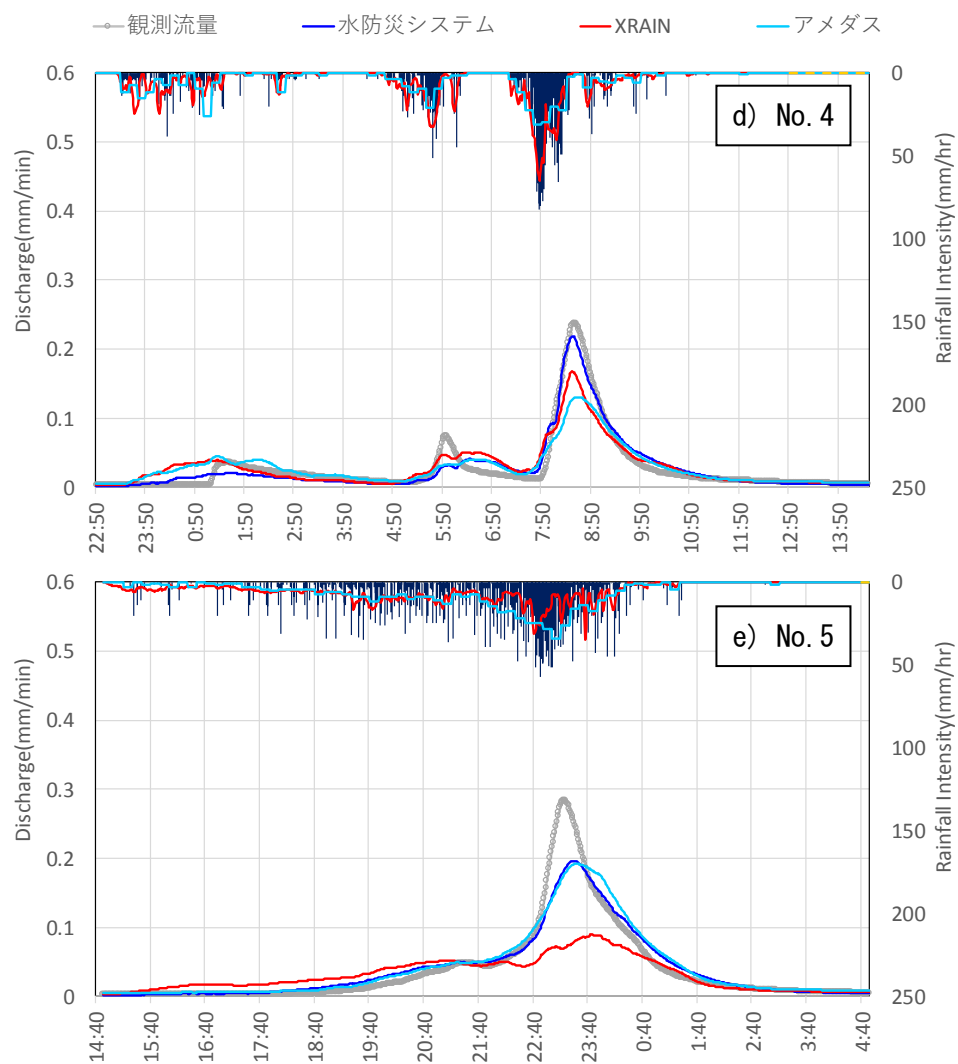


図 5-10 全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性
(Case1 流域平均雨量) (2)

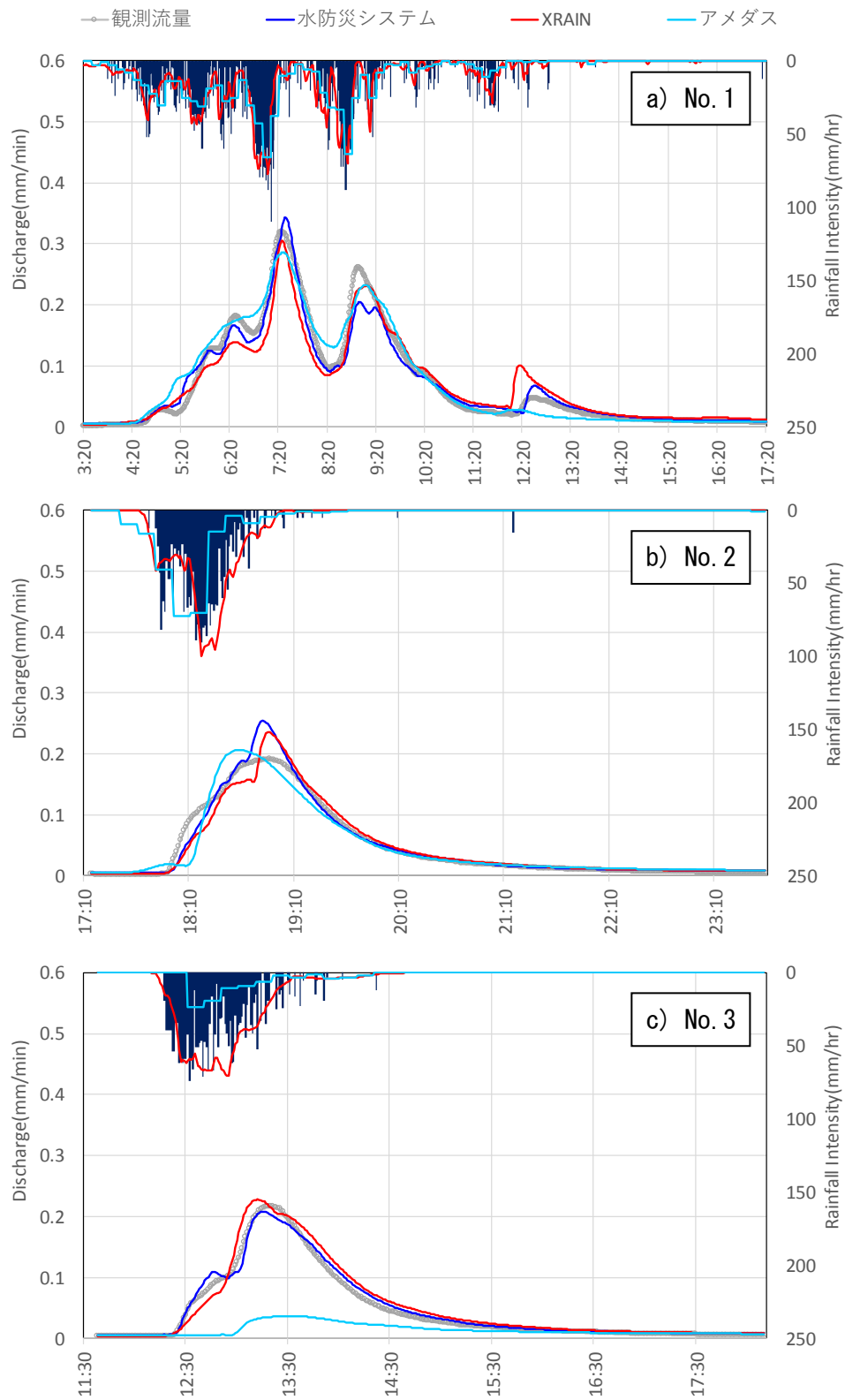


図 5-11 全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性
(Case2 メッシュ雨量) (1)

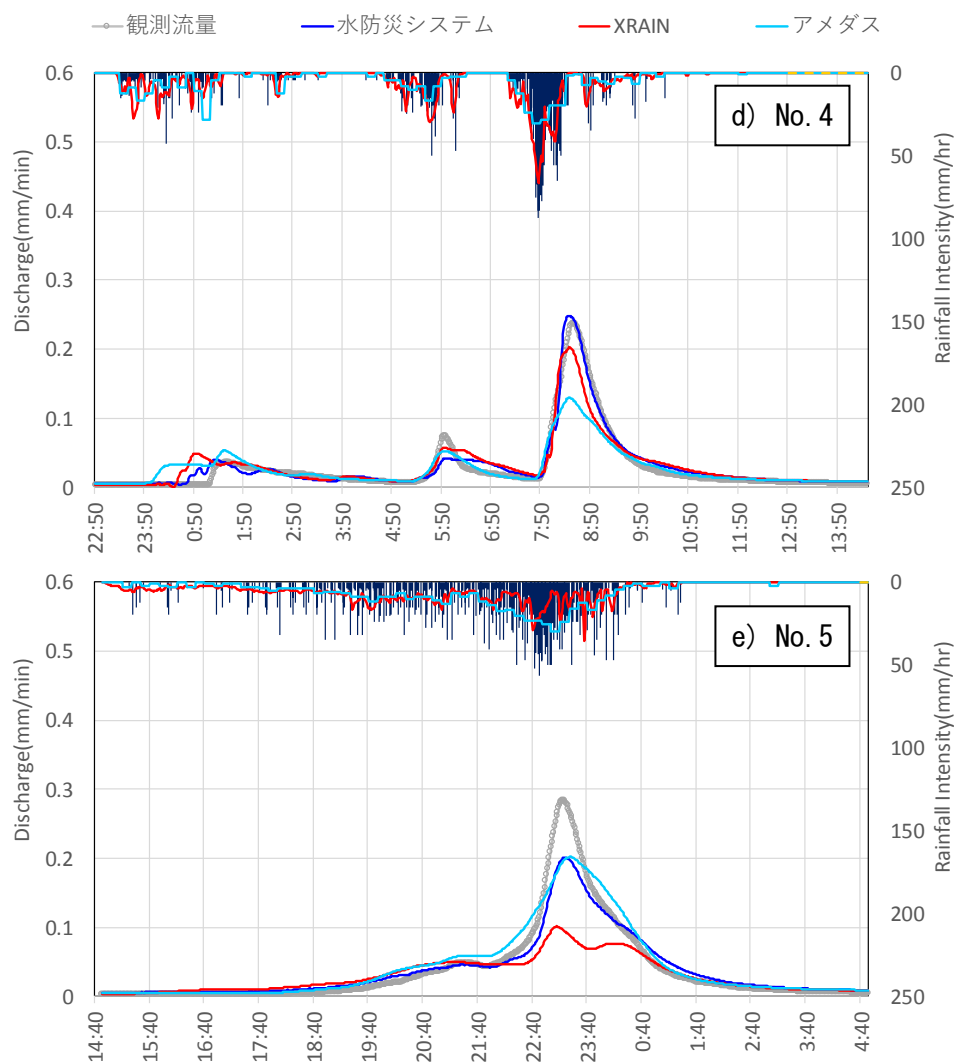


図 5-11 全豪雨イベント共通パラメータによる流出ハイドログラフの再現性
(Case2 メッシュ雨量) (2)

図5-12は, RMSEについて降雨データの種類別に示したものである. これより RMSE 平均値をみると, 水防災システムの Case1, Case2 における RMSE 平均値は, それぞれ 0.0131, 0.0124, XRAIN では, それぞれ 0.0216, 0.0204, アメダスでは, それぞれ 0.0256, 0.0265 となっている. RMSE 平均値でみると, 水防災システムが最も値が小さく, 続いて XRAIN, アメダスの順で大きくなった.

また, 水防災システムおよび XRAIN における RMSE 平均値をみると, 豪雨イベント別に最適パラメータを設定した場合と同様に, 両者ともに Case1 に比べて Case2 の方が小さい値となり, 流域平均雨量を用いた場合に比べて, メッシュ雨量を用いた場合の方が流出ハイドログラフの再現精度は全体的に向上している.

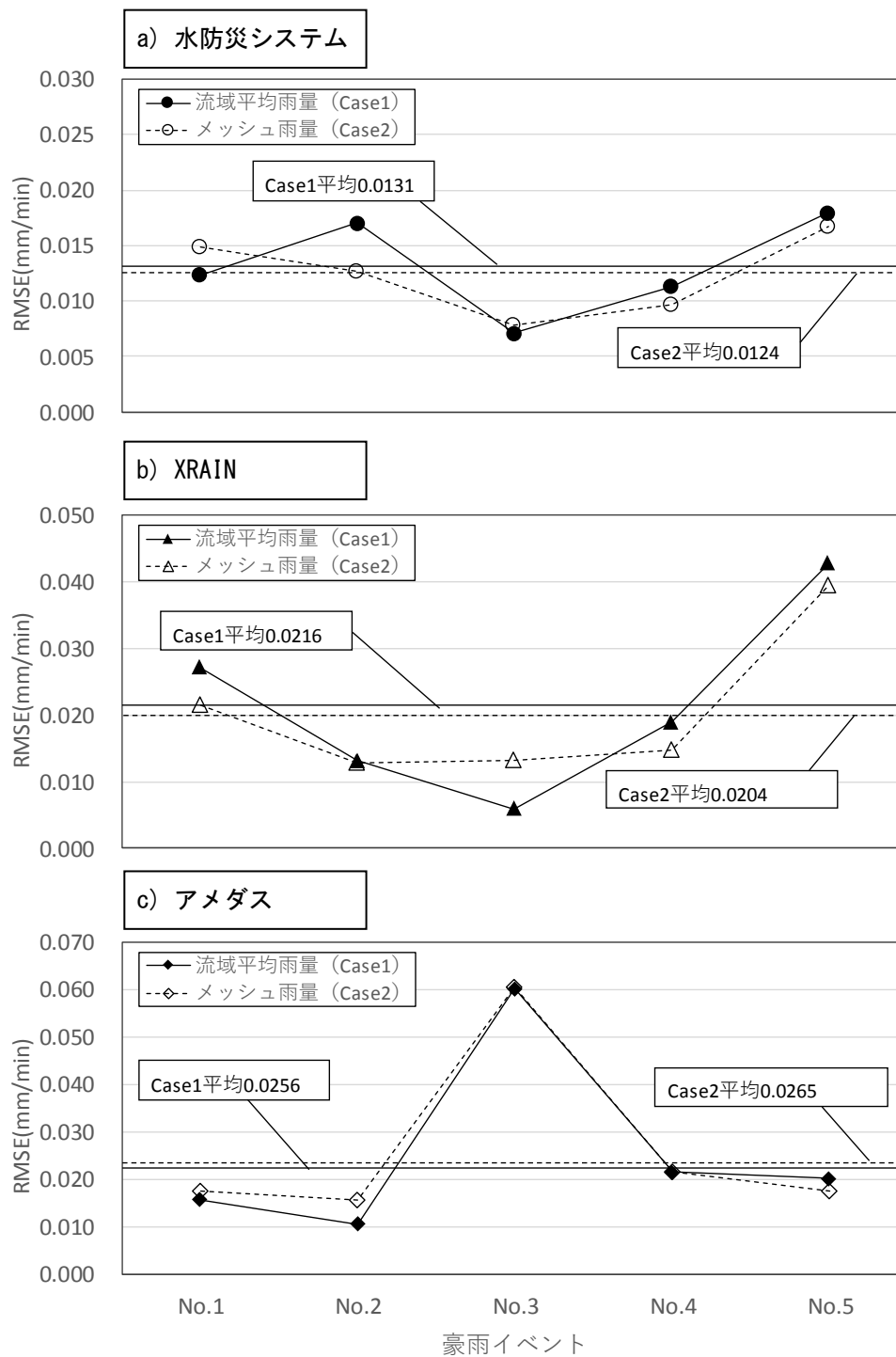


図 5-12 共通パラメータによる降雨データの種類の RMSE 図

ここで、水防災システムおよび XRAIN における Case1, Case2 の比較のため、豪雨イベント毎の RMSE を図 5-13 に、RMSE の平均値、最大値、最小値を表 5-4 に示した。これより、RMSE 平均値で比較すると、水防災システム、XRAIN とともに、Case2 メッシュ雨量を用いた場合は、Case1 流域平均雨量に比べて約 5%誤差が小さくなっており、かつ洪水毎の RMSE の範囲も小さくなっていることが確認できる。

これより、対象流域のような小さい流域においても XRAIN の詳細な空間分布を用いることは、流出モデルの再現性および安定性の向上に対して有効であることがわかる。その一方で、XRAIN は第 3 章で確認した時空間的な差異により、水防災システムに比べて RMSE は低くなっていると推察され、流出ハイドログラフの再現性の確保には、第 4 章と同様に水防災システムの降雨データを用いることが優位であることが確認された。

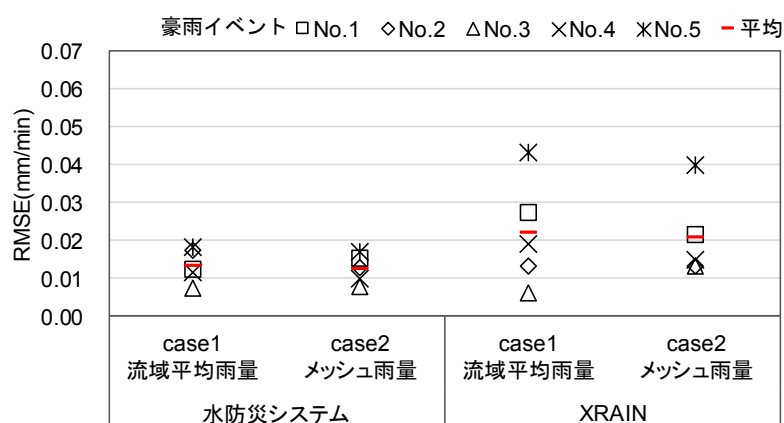


図 5-13 降雨データの種類の RMSE 図

表 5-4 降雨データの種類の RMSE 平均値、最大値、最小値

	水防災システム		XRAIN	
	Case1	Case2	Case1	Case2
平均値	0.0131	0.0124	0.0216	0.0204
最大値	0.0180	0.0167	0.0428	0.0395
最小値	0.0071	0.0078	0.0059	0.0128

図 5-14 は, 検討対象豪雨ケース別に全豪雨イベント共通パラメータとして設定した最適パラメータのうち, (f_0, α) について示したものである. これより, アメダスの場合におけるパラメータ f_0, α は, 他と比べて多少大きい値となっているものの, 図 5-9 で見られたような極端な乖離はみられず, ある程度の範囲内に設定された.

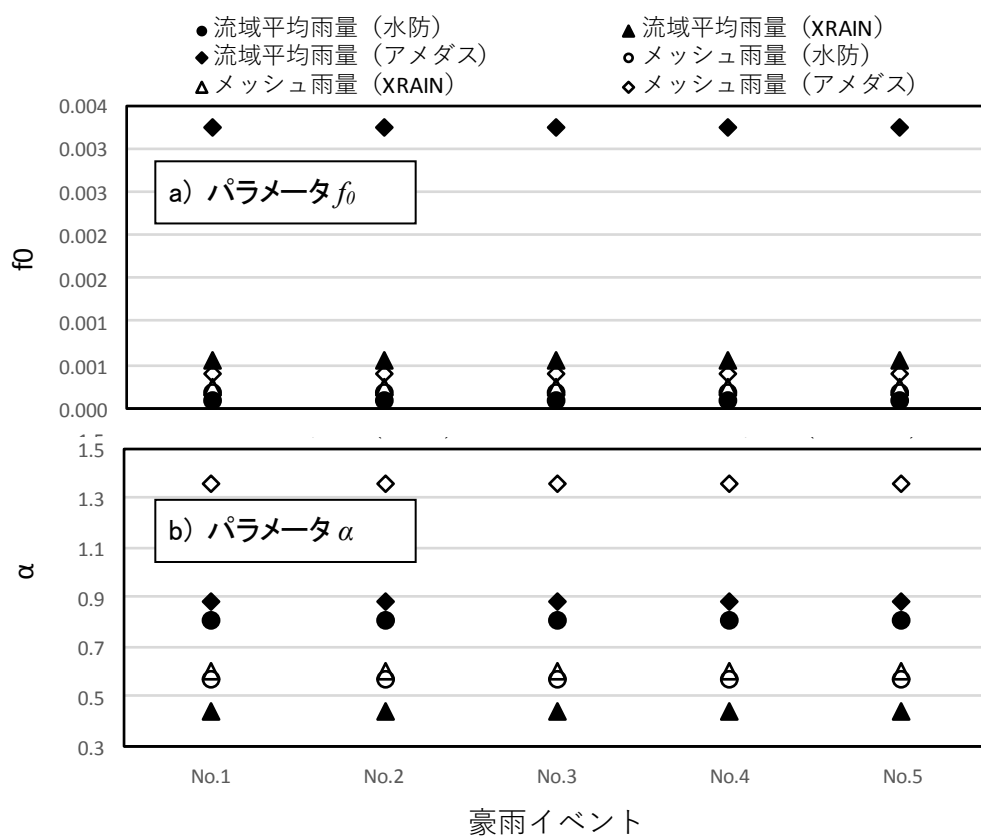


図 5-14 全豪雨イベント共通パラメータ

5-7 結語

本章では、神田川上流域における豪雨イベントを対象とし、XRAIN の有する詳細な時空間分解能を直接入力可能な分布型流出モデルを用いて、XRAIN、水防災システム、アメダスの雨量データによる流出ハイドログラフの再現性を検証した。その結果、水防災システムにおける高密度（観測地点間距離は東京都区部で平均約 3km）の地上雨量観測データを使用した場合、流出ハイドログラフの再現性が最も高いことがわかった。また、XRAIN は非常に詳細な空間分解能（約 $0.06\text{km}^2/1$ メッシュ）を有するものの、都市中小河川でそのまま流出計算の降雨データとして使用すると、流出ハイドログラフの再現性が低下する場合があることを確認した。これは第 4 章において、集中型概念モデル（USF モデル）をもとに実施した検討結果と同様の結果であり想定された内容である。

一方で、降雨データの空間分解能の差異については、流域平均雨量を全メッシュ一様に与えた場合とメッシュ雨量を与えた場合の比較より、XRAIN および水防災システムともに、メッシュ雨量による詳細な空間分布を与えることで、都市中小河川のような小さい流域においても流出ハイドログラフの全体的な再現性を向上することが可能であることを確認することができた。なお、豪雨イベント別に最適パラメータを設定した場合、降雨精度が確保されない場合に流出モデルのパラメータが、他豪雨の最適パラメータと比較して大きく乖離することが確認された。一方、全豪雨イベント共通パラメータを設定した場合は、流出ハイドログラフの再現性は若干低下するが、このようなパラメータの大きな乖離は抑えられた。

【参考文献】

- 1) 安陪和雄, 大八木豊, 辻倉裕喜, 安田佳哉: 分布型流出モデルの広域的適用, 水工学論文集, Vol.46, pp.247-252, 2002.

第 6 章 結 論

第6章 結 論

本研究では、神田川上流域を対象として、都市域の流出解析や河川水位推定に求められる詳細な時空間分解能を有する X バンド MP レーダ雨量の精度を明らかにするため、東京都に高密度に配置された 1 分間隔による地上降雨観測データ（東京都水防災総合情報システム）との比較により X バンド MP レーダ雨量の精度評価を実施した。また、X バンド MP レーダ雨量と地上雨量観測所との比較においては、観測所直上メッシュのみでなく観測所周辺メッシュの降雨データも対象とした時空間相関特性解析を実施するとともに、移流モデルによる雨域移動特性を分析し、雨域移動特性と時空間相関特性の関係性を明らかにした。次に、X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析を実施する際の X バンド MP レーダ雨量の詳細な時空間分解能が流出ハイドログラフの再現性に与える影響を明らかにするため、都市の流出機構を考慮した集中型概念モデルである USF（Urban Storage Function）モデルを用いて X バンド MP レーダ雨量と地上雨量による流出解析を実施し、降雨データの差異がハイドログラフの再現性に与える影響について検証した。さらに、X バンド MP レーダ雨量の有する空間分解能を直接入力可能な 250m メッシュ分布型流出モデルを構築するとともに流出計算ハイドログラフの再現性を検証し、その時空間分解能が流出計算ハイドログラフに与える影響について明らかにした。以下に、各章で得られた成果をとりまとめる。

第 1 章「序論」では、本研究の背景と目的を明らかにするため、X バンド MP レーダ雨量の精度及び X バンド MP レーダ雨量を用いた流出計算について現状と課題を示した。この中で、X バンド MP レーダ雨量に関する既往の研究を概観するとともに、X バンド MP レーダを用いた都市流域における豪雨の時空間および流出特性に関する基礎的研究におけるワークフローを示した。

第 2 章「1 分値データによる X バンド MP レーダ雨量の精度評価」では、東京都の神田川上流域を対象として 2013 年の地上観測点における 30 分降雨強度を基に 10 豪雨イベントを選定し、1 分値地上雨量と観測所直上メッシュの 1 分値 X バンド MP レーダ雨量との比較によりレーダ雨量の精度を検証した。その結果、1 分値レーダ雨量は、一般的

に使用されている 10 分値レーダ雨量では捉えられないピーク雨量の強度およびその生起時刻を正確にとらえることが可能であること、および 1 分値レーダ雨量は地上雨量と比較して 1~3 分程度早く降雨を観測していることを見いだした。

第 3 章「X バンド MP レーダ雨量の時空間特性解析」では、神田川上流域における 2013 年の上位 5 豪雨イベントを対象に、X バンド MP レーダ雨量の観測所直上メッシュのみならず観測所周辺メッシュ範囲のレーダ雨量データを含めて、地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の時空間相関特性解析を実施した。その結果、観測所直上メッシュの X バンド MP レーダ雨量は、地上雨量に対して 2 分程度の遅れ時間で相関が最も高くなることを確認した。さらに、周辺メッシュとの比較により、観測所直上メッシュよりも通常観測所周辺メッシュにおいて、最も相関の高いメッシュが存在することを明らかにし、特に台風性豪雨の場合には、雨域移動が空間的な相関特性を支配する主要因であることを確認した。また、この時空間的な差異により、一般的に比較対象とする観測所直上メッシュの X バンド MP レーダ雨量は地上雨量との相関性を過小評価する恐れがあることを示した。

第 4 章「USF モデルによる豪雨流出特性」では、神田川上流域において入力降雨データの差異が流出解析にどのような影響を与えるかを把握するため、X バンド MP レーダ雨量および空間的に密な地上雨量による流域平均雨量を用いて、都市の流出機構を考慮した集中型概念モデルである USF (Urban Storage Function) モデルによる流出解析を実施し、流出ハイドログラフの再現性を検証した。その結果、X バンド MP レーダ雨量は詳細な空間分解能を有するものの、都市中小河川で流出解析の降雨データとして使用した場合、密な地上雨量を用いた場合と比較して流出ハイドログラフの再現性が低下することを明らかにした。また、第 3 章で検討した時空間的な差異を補正した X バンド MP レーダ雨量を用いることにより、流出ハイドログラフは地上雨量を用いた場合に近い再現性を確保できることを示した。

第 5 章「分布型流出モデルによる豪雨流出特性」では、第 4 章と同様の豪雨イベントを対象とし、X バンド MP レーダ雨量の降雨分布を直接入力可能な 250m メッシュの土研分布型流出モデルを用いることにより、降雨データの詳細な空間分解能が流出ハイドログラフの再現性に与える影響を検証した。その結果、レーダ雨量、地上雨量ともに流域平均雨量を用いた場合と比較して、詳細な空間分解能を与えることで流出ハイドログラフの再現性が 5%程度向上することを示すとともに、分布型流出モデルを用いた場合においても空間的に密な地上雨量を用いる方が流出ハイドログラフの再現性が高くなる

ことを確認した。

以上により，都市中小河川流域を対象として，詳細な時空間分解能を有する X バンド MP レーダ雨量の降雨精度および時空間相関特性に関して新たな知見を得るとともに，地上雨量や X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析により，各降雨データが流出ハイドログラフへ与える影響および流出特性についての有益な知見が得られたと考える。

以下に，都市中小河川流域における X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析に関して留意すべき事項を記載するとともに，今後どのように発展していくべきかについて述べる。

まず，都市中小河川流域は，1 級河川流域などと比べると極めて小さい流域であり，台風性のような長期的な降雨のみならず，短時間における局所豪雨により河川水位の上昇や内水による浸水被害が発生するという特性がある．本研究では地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の時空間相関特性より，特に局所豪雨においては観測所直上メッシュではなく 1km 程度範囲の周辺メッシュで相関性が高くなることを明らかにした．特に都市中小河川流域で流域に到達する降雨量は，この時空間相関特性が原因となり地上雨量と X バンド MP レーダ雨量との間で大きな差異を生じる恐れがある．また，地上雨量および X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析により把握した流出特性から，都市中小河川において第一に優先されるべきは，空間的な降雨分布や空間分解能の細かさよりも，流域に到達する流域平均雨量および時系列データの正確な把握である．流域に到達する降雨量を正確に把握するためには，地上雨量観測所を密に配置して時空間的に降雨データを直接観測することが理想的である．本研究で対象とした神田川上流域の場合は，東京都の整備する水防災システムの地上雨量観測データを使うことが可能であった．これにより，対象流域は小さい流域（7.7km²）であるが，流域内に 3 地点もの地上雨量観測所が存在した．このような非常に密な観測データがある場合は，これを活用することが精度確保のために最良の手法である．

しかしながら，このような密な地上雨量観測所を有している流域は全国的にはほとんどない．気象庁アメダスの降雨観測所は，全国約 1,300 箇所，観測間隔は約 17km の全国で使用可能な降雨データであるが，本研究で対象とした神田川上流域では流域内にアメダス降雨観測所は存在しない．神田川上流域における至近のアメダス降雨観測所は，練馬もしくは世田谷であるが，ともに 5km 程度は離れている．神田川上流域においてアメダス降雨データを用いた場合，流出ハイドログラフの再現性はその精度，安定性とも

に低く、X バンド MP レーダ雨量を用いた方が流出解析精度を確保する上では優位であることを確認している。

したがって、都市中小河川流域で X バンド MP レーダ雨量を活用していくことは有効な手段であり、X バンド MP レーダ雨量データが入手可能なエリアでは積極的に利用していくことが望まれる。その一方で、地上雨量と X バンド MP レーダ雨量の時空間相関特性から、台風性のような広範囲の雨域移動を伴う場合は空間的な差異が比較的小さいが、局地的な集中豪雨においては空間的な差異が非常に大きくなる場合がある。その場合、X バンド MP レーダの降雨精度の低下とそれによる流出解析における流出ハイドログラフの再現性の低下が問題となる。都市中小河川流域では局所豪雨により内水氾濫被害等が全国的に頻発しており、局所豪雨における降雨精度を精度高く把握することが極めて重要となる。本研究では、X バンド MP レーダへ時空間的な補正を実施することで流出ハイドログラフの再現精度が改善可能なことを示唆し、レーダ雨量の精度向上への一つの方向性を示した。

さらに、流域に到達する流域平均降雨の精度確保した上で、詳細な降雨の空間分布を活用することにより、都市中小河川流域のような小さい流域においても、流出ハイドログラフの再現性が向上される。X バンド MP レーダ雨量の詳細な空間分布と分布型流出モデルのようなレーダ雨量のメッシュ分布を反映できる流出モデルを用いて、都市中小河川流域での流出解析の再現精度を確保・向上していくことが求められる。また、流出モデルを活用する際には、入力するメッシュ雨量を最大限に活用可能なモデルパラメータの設定が求められるため、SCE-UA 法等のアルゴリズムを活用することで効率的かつ精度良く最適なモデルパラメータを同定し、流出モデルの機能を最大限に高めておくことも重要なポイントである。

以上を踏まえて都市流域における流出ハイドログラフ推定フローを図 6-1 に示した。基準点などにおける流出ハイドログラフの推定を目的とした場合、地点上流域内に複数の雨量観測所がある流域では、地上雨量データと集中型モデル等により流出ハイドログラフの高い推定精度を確保することが望まれる。流域内に雨量観測所がない場合は、地上雨量の空間代表性が低下するため X バンド MP レーダ雨量を用いることで良いと考えるが、特に局地的な集中豪雨において流出ハイドログラフの推定精度が低下する恐れがある点に注意が必要である。一方、近年のゲリラ豪雨等による浸水被害の頻発を鑑みると、流域内の洪水リスク管理のためには基準点上流域も含めた河道縦断や面的な流出量

の把握が重要となる場合も多い。この場合は X バンド MP レーダと分布型流出モデル等の活用により、空間的に詳細な流出量の推定が望まれるため、求める精度や必要な空間分解能を踏まえ、使用する雨量データやモデルを適切に使い分けていくことが重要である。

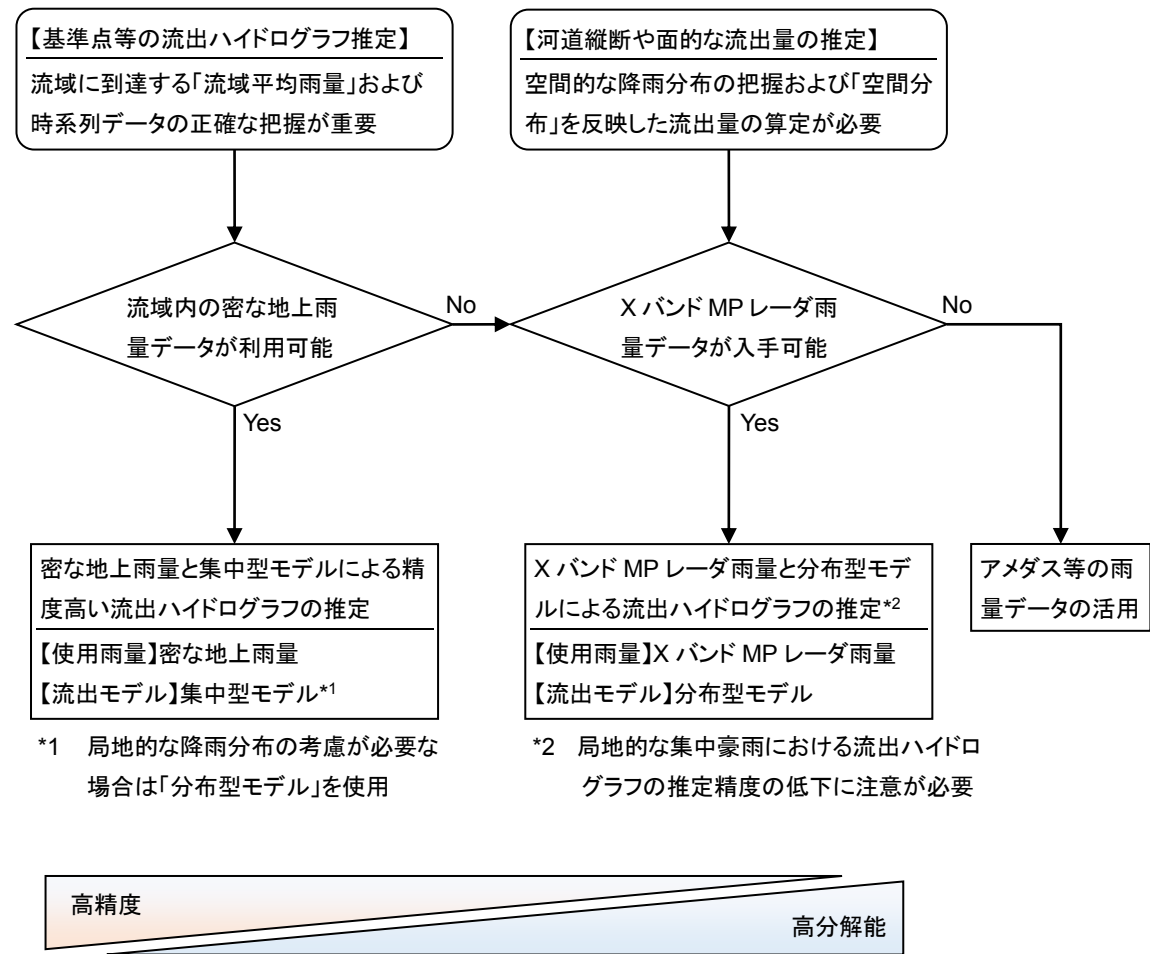


図 6-1 都市流域における流出ハイドログラフ推定フロー

最後に、本研究における X バンド MP レーダ雨量に関する知見をもとに、今後取り組むべき課題を述べる。まず、本研究の X バンド MP レーダ雨量の時空間相関特性について、流域規模の異なる他流域等を対象としてその普遍性を検証していくことが必要である。その際には、より観測単位の細かい雨量計やディストロメータ等の降雨データの使用が望まれる。また、流出ハイドログラフの再現精度を向上するため、実時刻で X バンド MP レーダの時空間的な補正が可能となる適用性の高い補正手法の確立が必要である。この時空間的な補正は、X バンド MP レーダ雨量の時空間相関特性に影響すると想定される雨域移動に加えて、本研究で明らかにできなかった風向・風速や上昇気流などの気象状況との関係性についても気象観測データや気象モデル等を活用して明らかにすることが望まれる。その上で X バンド MP レーダ雨量を用いた流出解析を行うことで、流出量や浸水、内水現象に関してより精度の高い予測情報の推定が可能となり、都市流域において、これらの予測情報をより有効性の高い防災情報として活用していくことが期待される。

謝 辭

謝 辞

本論文をとりまとめるにあたり，首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域の河村明教授には，指導教官として研究テーマ設定から論文執筆，学会発表にいたる多方面にわたり，惜しみないご指導を賜りました．ここに心から深く感謝の意を表します．

首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域の横山勝英教授，首都大学東京大学院都市環境科学研究科地理環境学域の高橋日出男教授には，本論文を審査いただくとともに適確なご助言とご指導をいただきました．深く感謝申し上げます．首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域の天口英雄助教には，研究に対して的確なアドバイスと暖かい激励をいただきました．心から感謝の意を表します．

今回，会社に在籍しながら研究活動の場を快く与えていただきました（株）建設技術研究所西村達也東北支社長，小滝訓一大阪本社営業部部長，伊藤猛東京本社水システム部部長，中村謙一中部支社河川部部長に心から深く感謝申し上げます．また，共に仕事をしている（株）建設技術研究所東京本社水システム部，中部支社河川部のメンバーには，多くのご支援と励ましをいただきました．社会人大学生として研究を進めることができたのも，多くの方々からの暖かいご支援とご協力によるものです．ここに深く感謝の意を表します．